

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE – CONCENTRATION
GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
MOHAMED REDA EZZARZOURI

MÉTHODOLOGIE DE MESURE DE L'IMPACT DU
REGROUPEMENT DES ARRÊTS ET DE LA VARIATION DE LA
LIMITE DE MARCHE DANS LE PROBLÈME DU TRANSPORT
SCOLAIRE

FÉVRIER 2017

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Ce mémoire intitulé :

MÉTHODOLOGIE DE MESURE DE L'IMPACT DU REGROUPEMENT DES
ARRÊTS ET DE LA VARIATION DE LA LIMITE DE MARCHÉ DANS LE
PROBLÈME DU TRANSPORT SCOLAIRE

présenté par : EZZARZOURI Mohamed reda

en vue de l'obtention du diplôme de : Maître ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

FORGET Pascal, Ph. D., ing., directeur de recherche

ABDUL-NOUR Georges, Ph.D., ing., membre du jury

AUDY Jean-François, Ph.D., ing. f., membre du jury

DÉDICACE

À ma grande mère Rokaya.

À ma fille Rokaya.

Vous êtes toujours dans mon cœur

et vous y resterez à jamais.

Je vous aime beaucoup.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier M. Pascal Forget, mon directeur de recherche, pour son implication et son souci de veiller à me faciliter l'accès à toutes les informations, ainsi que M. Georges Abdul-nour, pour son support et son encadrement. Je tiens aussi à remercier la commission scolaire Chemin-du-Roy pour avoir accepté de me rencontrer à plusieurs reprises et de me fournir de l'aide et des données afin que je puisse mener à bien ma recherche. Ensuite, je remercie la GRICS, dont le vice-président Denis Bessette, pour leur soutien et l'accès à des informations sur le logiciel Geobus.

Je souligne, par la même occasion, ma reconnaissance à mes anciens professeurs, entre autres Mme Chantal Baril, Benoît Désilets, Denis Carrier, Lotfi Toubal, Mhamed Mesfioui, François Gauthier, Pierre C. Dessureault, Hélène Milette et Yves Dubé pour leur soutien et leurs conseils.

Finalement, je tiens à remercier toute personne, qui, de près ou de loin, a participé dans la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

La gestion du transport scolaire est aujourd'hui un défi de taille en raison de l'explosion des demandes des familles suite à l'expansion des territoires, associée à la dispersion de la population, des demandes de changement d'adresse en cours d'année, de la décomposition ou recomposition des familles, des gardes partagées ou encore pour des soucis de sécurité. À cela s'ajoutent les coûts associés à la consommation de carburant qui sont de plus en plus élevés, provoquant une hausse de la facture du transport scolaire.

Le contexte économique et politique actuel pousse les commissions scolaires à chercher des moyens pour faire des économies sur tous les plans, incluant le transport des élèves.

Pour améliorer l'efficacité de ce service, la recherche opérationnelle offre des méthodes et techniques orientées vers la recherche de la meilleure solution. Par une analyse et une modélisation du problème, elle permet aux décideurs de faire de meilleurs choix. Le problème du transport scolaire (*School Bus Routing Problem – SBRP*) est très présent dans la littérature. C'est une variante du problème de tournées de véhicules (*Vehicle Routing Problem – VRP*). Le problème du SBRP consiste à planifier des tournées d'autobus scolaires, où chaque autobus doit ramasser des élèves à différents arrêts pour les transporter vers leur école, tout en respectant une durée maximale de voyage, une capacité maximale d'un autobus scolaire, une fenêtre de temps pour l'embarquement et le débarquement des élèves, ainsi qu'une distance maximale de marche de la maison vers l'arrêt.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une méthode pour mesurer les impacts de deux changements dans la façon actuelle de planifier le transport scolaire, soit le regroupement optimal des arrêts d'autobus et l'augmentation progressive de la distance de marche maximale de l'élève vers l'arrêt d'autobus.

Pour y arriver, un modèle de regroupement optimisé des arrêts est proposé, par l'utilisation d'un algorithme glouton lors de la phase de sélection des arrêts et d'un algorithme hybride

glouton-tabou à la phase de routage. Par la suite, en modifiant la limite maximale de marche de l'élève vers l'arrêt, on mesure différents indicateurs de performance des routes obtenues, soit économique, environnemental et relatif à la santé des élèves.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	IV
REMERCIEMENTS	V
RÉSUMÉ	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	3
1.1. Contexte de la recherche	3
1.2. Objectif de la recherche	6
1.3. Structure du mémoire	7
CHAPITRE 2 RECENSION DES ÉCRITS	8
2.1. Le problème du transport scolaire.....	9
2.1.1. Historique du SBRP	9
2.1.2. Recherches antérieures sur le SBRP	10
2.1.3. Synthèse de recension des écrits sur le SBRP.....	12
2.2. Étapes de résolution du SBRP	15
2.2.1. Collecte de données.....	15
2.2.2. Regroupement	16
2.2.3. Sélection des arrêts.....	18
2.2.4. Routage	20
2.2.5. Planification	25
2.2.6. Synthèse des méthodes de résolution du SBRP	26
2.3. Indicateurs de performance	30
2.3.1. Indicateurs économiques	31
2.3.2. Indicateurs relatifs à l'environnement et à la santé des enfants.....	42

2.3.3.	La synthèse de la revue des indicateurs	47
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE		49
3.1.	Collecte des données	51
3.2.	Regroupement	53
3.3.	Sélection des arrêts.....	58
3.3.1.	Méthode actuelle de sélection des arrêts.....	58
3.3.2.	La méthode optimisée de sélection des arrêts	61
3.3.3.	Comparaison entre les deux méthodes de sélection.....	66
3.4.	Routage	67
3.4.1.	Création d'une route initiale	68
3.4.2.	Amélioration de la route initiale	75
3.5.	Calcul des indicateurs de performances.....	82
3.5.2.	Impact économique	85
3.5.3.	Impact environnemental.....	86
3.5.4.	Impact sur la santé des élèves	86
3.6.	La variation de la distance de marche	86
3.7.	Analyse des résultats	87
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSE		89
4.1.	Application de l'algorithme optimisé sur une instance réaliste	89
4.2.	Calcul des indicateurs	90
4.2.1.	Impact économique	90
4.2.2.	Impact environnemental.....	93
4.2.3.	Impact sur le transport actif.....	94
4.3.	Analyse des résultats.....	94
4.3.1.	Analyse statistique	94
4.3.2.	Analyse économique	95
4.3.3.	Discussion	97
CONCLUSION		99
RÉFÉRENCES.....		101
ANNEXE I.....		110

ANNEXE II.....	114
ANNEXE III	118
ANNEXE IV	122
ANNEXE V	131
ANNEXE VI.....	148
ANNEXE VII.....	152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Évolution du coût du transport scolaire entre 2008 et 2013 dans les commissions scolaires du Québec (MELS, 2014)	3
Tableau 1.2 Évolution du nombre des élèves transportés entre 2008 et 2013 dans les commissions scolaires du Québec (MELS, 2014)	4
Tableau 2.1 Les caractéristiques d'un SBRP (Park et Kim, 2010)	12
Tableau 2.2 Tableau récapitulatif des travaux sur le SBRP (complété à partir de Park et Kim, 2010)	13
Tableau 2.3 Tableau récapitulatif des travaux sur le SBRP (complété à partir de Park et Kim, 2010) (suite)	14
Tableau 2.4 Les paramètres de modélisation du regroupement	17
Tableau 2.5 Les paramètres de modélisation du routage	21
Tableau 2.6 Synthèse des approches de résolution du SBRP	27
Tableau 2.7 Synthèse des approches de résolution du SBRP (suite)	28
Tableau 2.8 Synthèse des approches de résolution du SBRP (suite)	28
Tableau 2.9 Caractéristiques techniques de l'autobus analysé (Transport Canada, 2009)	32
Tableau 2.10 Les PM _{2.5} et PM ₁₀ moyennes pour les freins et pneus (EPA, 2014)	36
Tableau 2.11 Distances (en mètres) nécessaire pour atteindre une vitess cible à partir d'une vitesse initiale (AASHTO, 2001)	39
Tableau 2.12 Distances (en mètres) nécessaire pour atteindre une vitess cible à partir d'une vitesse initiale (NCHRP, 2003)	39
Tableau 2.13 Distances (en mètres) nécessaire pour atteindre une vitess cible à partir d'une vitesse initiale (DDC, 2009)	40
Tableau 2.14 Résumé des modèles pour simuler la décélération (Maurya et al., 2016) ..	41
Tableau 2.15 Paramètres des modèles avec la vitesse critique (Maurya et al., 2016)	42
Tableau 2.16 Tableau récapitulatif des paramètres du calcul	48

Tableau 3.1 Coordonnées des adresses d'élèves, des arrêts et de l'école de l'instance exemple	52
Tableau 3.2 Matrice de sélection des arrêts de la méthode actuelle	60
Tableau 3.3 Table d'assignation des arrêts selon la méthode actuelle.....	60
Tableau 3.4 Matrice Élèves – Arrêts modifiée.....	62
Tableau 3.5 Matrice d'accessibilité	63
Tableau 3.6 Première transformation de la matrice d'accessibilité	64
Tableau 3.7 Deuxième transformation de la matrice d'accessibilité	65
Tableau 3.8 Troisième transformation de la matrice d'accessibilité	65
Tableau 3.9 Quatrième transformation de la matrice d'accessibilité	65
Tableau 3.10 Cinquième transformation de la matrice d'accessibilité.....	65
Tableau 3.11 Table d'assignation selon l'algorithme optimisé de sélection des arrêts....	66
Tableau 3.12 La matrice De - À pour les arrêts retenus.....	70
Tableau 3.13 Obtention des valeurs de rang	71
Tableau 3.14 Matrice de rang.....	71
Tableau 3.15 Matrice des produits	72
Tableau 3.16 Solution de routage initial de l'instance exemple	73
Tableau 3.17 Paramètres de l'algorithme tabou.....	77
Tableau 3.18 Inversions possibles à partir de la route initiale	78
Tableau 3.19 Classement des dix meilleures solutions de la première itération.....	79
Tableau 3.20 Évolution de la liste tabou au cours des itérations	80
Tableau 3.21 Résultats de chaque itération effectuée	81
Tableau 3.22 Solution de l'algorithme de routage	81
Tableau 3.23 Distances pour atteindre 50 km/h selon les tables.....	83
Tableau 3.24 Les PM2.5 et PM10 moyennes pour les freins et pneus avec l'utilisation de MOVES 2014.....	84
Tableau 3.25 Estimation des paramètres de calcul des indicateurs	84
Tableau 3.26 Solutions obtenues pour l'instance exemple.....	85
Tableau 3.27 Indicateurs économiques pour les deux méthodes de sélection	85

Tableau 3.28 Taux d'émission de GES par les deux méthodes.....	86
Tableau 3.29 Transport actif avec les deux méthodes	86
Tableau 3.30 Synthèse des indicateurs selon la variation de la distance maximale de marche	87
Tableau 3.31 Synthèse des taux de variation des indicateurs selon les taux de variation de la distance maximale de marche.	88
Tableau 4.1 Résultats obtenus.....	90
Tableau 4.2 Taux de variation des indicateurs en fonction de la limite de marche	91
Tableau 4.3 Les paramètres de la régression linéaire	95
Tableau 4.4 Nombre de véhicules de transport d'élèves par type	96
Tableau 4.5 Critères d'admissibilité au transport scolaire.....	96
Tableau 4.6 Le calcul du coût par rapport à la distance de marche	97

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Fonctionnalités du logiciel GEOBUS.....	6
Figure 2.1 Les 5 étapes de résolution du SBRP	15
Figure 2.2 Variation du taux de la consommation du carburant en fonction de la vitesse (Transport Canada, 2009).....	32
Figure 2.3 Schéma du frein à tambour	33
Figure 2.4 Schéma du frein à disque	33
Figure 2.5 Variation de la vitesse en fonction du temps adapté de Oder et al. (2010)	34
Figure 2.6 Variation de la température des freins pour le même cycle adapté de Oder et al. (2010)	35
Figure 2.7 Variation des contraintes mécaniques des freins pour le même cycle adapté de Oder et al. (2010)	35
Figure 2.8 Schématisation d'un voyage d'autobus scolaire	36
Figure 2.9 Changement de la température et radiation solaire selon les années adapté de (GIEC, 2014).....	43
Figure 2.10 Diagrammes des sources des GES (Environnement et Changement climatique Canada, 2016)	43
Figure 2.11 Émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de Canada de 1990 à 2013 (Statistique Canada, 2013)	44
Figure 2.12 Exemple de calcul du taux des émissions de GES en fonction de la vitesse (Boulter, 2009)	45
Figure 3.1 Méthodologie proposée	49
Figure 3.2 Représentation géospatiale de l'instance exemple	52
Figure 3.3 Étapes de l'algorithme de regroupement	54
Figure 3.4 Regroupement par rapport aux centroïdes de départ pour l'instance exemple	55
Figure 3.5 Regroupement avec les nouveaux centroïdes pour l'instance exemple	56
Figure 3.6 Processus d'équilibrage des regroupements.....	57

Figure 3.7 Répartition des élèves en regroupements pour l'instance exemple.....	58
Figure 3.8 Étapes de la méthode actuelle de sélection des arrêts.....	59
Figure 3.9 Étapes de l'algorithme de sélection des arrêts	61
Figure 3.10 Algorithme de sélection de résolution du problème de recouvrement	64
Figure 3.11 Solution d'assignation des élèves selon la méthode de sélection des arrêts actuelle	66
Figure 3.12 Solution d'assignation des élèves selon l'algorithme de sélection des arrêts optimisé proposé	67
Figure 3.13 Étapes de l'algorithme de routage proposé	68
Figure 3.14 Étapes de la création de la route initiale	69
Figure 3.15 L'arborescence de la séquence du routage	73
Figure 3.16 Arborescence de la séquence du routage	74
Figure 3.17 Résultat de la création de la route initiale	74
Figure 3.18 Étapes de l'amélioration de la route initiale.....	76
Figure 3.19 Présentation géospatiale de la route améliorée	81
Figure 4.1 Consommation du carburant en fonction de la distance de marche	91
Figure 4.2 Variation du temps du voyage en fonction de la distance de marche.....	92
Figure 4.3 Dégradation des pneus et freins en fonction de la distance de marche	93
Figure 4.4 Émissions de GES en fonction de la distance de marche	93
Figure 4.5 Variation de la distance moyenne marchée par élève en fonction de la distance de marche	94
Figure 4.6 Évolution des indicateurs de performance en fonction de la limite de la distance de marche	96

INTRODUCTION

Depuis les années soixante, le transport scolaire au Québec a permis d'accroître l'accessibilité à l'école publique en toute sécurité. Chaque commission scolaire peut déterminer ses propres règles de gestion du transport scolaire. Aujourd'hui, ce service commence à peser lourd sur les budgets des commissions scolaires. Pour l'année scolaire 2012-2013, les commissions scolaires ont déboursé ensemble plus d'un demi-milliard de dollars pour organiser le transport scolaire (MELS, 2014). Selon ce même rapport, on peut voir que même si le nombre des élèves transportés est resté constant, les dépenses n'ont cessé d'augmenter. Chaque année, les prévisions budgétaires sont dépassées en raison des écarts entre les budgets alloués et les dépenses réelles. L'augmentation du coût du carburant, de la main-d'œuvre et l'inflation a contribué à l'augmentation des coûts, mais aussi la variabilité présente dans la gestion du transport scolaire d'une commission scolaire à une autre, que ce soit pour l'octroi des contrats, les tarifications ou autres (Vérificateur général de Québec, 2011).

Actuellement, la gestion du transport scolaire dans les commissions scolaires se fait avec un seul objectif : assurer le service de transport à tous les élèves qui y ont droit. Or, dans un contexte de contraintes budgétaires, il est nécessaire d'intégrer la notion d'efficience et repenser les façons de gérer le transport.

Dans la littérature, on trouve un grand nombre de travaux scientifiques liés au transport scolaire, mieux connus sous le nom du problème du transport scolaire (*School Bus Routing Problem* - *SBRP*). Les chercheurs ont adopté des approches différentes, selon les particularités et l'envergure du problème, touchant une ou plusieurs étapes du SBRP. Les étapes de résolution du SBRP, qui reviennent le plus souvent, sont la collecte des données, le regroupement des élèves, la sélection des arrêts, le routage et la planification.

Ce mémoire s'inscrit dans la voie de l'optimisation de la gestion du transport scolaire. Plus particulièrement, ce mémoire propose une méthode pour mesurer les impacts de deux

changements dans la façon actuelle de planifier le transport scolaire, soit le regroupement optimal des arrêts d'autobus et l'augmentation progressive de la distance de marche maximale de l'élève vers l'arrêt d'autobus.

Ce mémoire s'avère pertinent pour trois principales raisons. La première est liée à l'une des recommandations du vérificateur général (Vérificateur général de Québec, 2011) qui préconisait une révision de la gestion économique du transport scolaire. La seconde est scientifique, puisque le regroupement des arrêts et la variation de la limite de la distance de marche sont souvent omis dans la littérature : la grande majorité des chercheurs considère l'emplacement des arrêts d'autobus et la limite de la distance de marche comme des données de départ immuables. La troisième est technique, puisque les commissions scolaires n'ont pas actuellement de moyen de vérifier l'impact de regrouper les arrêts et d'augmenter la distance de marche maximale des élèves.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, une présentation du contexte et de l'objectif de la recherche sont présentés. Au deuxième chapitre, la recension des écrits présente les recherches en lien avec le problème du transport scolaire, comment le résoudre et les différents indicateurs de performance. Le troisième chapitre décrit la méthodologie proposée pour mesurer l'impact du regroupement des arrêts et de l'augmentation de la limite maximale de marche vers l'arrêt. Les différentes étapes de la méthodologie sont présentées à l'aide d'une démonstration sur une instance exemple. Dans le quatrième chapitre, la méthodologie est appliquée à une instance réaliste et les résultats sont présentés. Finalement, une conclusion est présentée, incluant des propositions d'améliorations futures et les limites du mémoire.

CHAPITRE 1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

1.1. Contexte de la recherche

Le vérificateur général du Québec a livré, dans son rapport pour l'année 2010-2011, ses conclusions concernant le transport scolaire. Il a soulevé, en outre, un problème au niveau des normes encadrant le transport scolaire, incluant le choix de la distance de marche, le transport à l'heure du dîner, une absence de motivation pour améliorer le rendement et le manque de compétences des directions responsables du transport scolaire pour réduire les dépenses (Vérificateur général de Québec, 2011).

Selon les données relatives au transport scolaire pour l'année scolaire 2012-2013 (tableau 1.1), les commissions scolaires du Québec ont déboursé au total 626,31 millions de dollars pour réaliser le transport scolaire (MELS, 2014). Au cours des dernières années, comme cela est permis par la réglementation, la quasi-totalité des contrats de transport scolaire a été accordée de gré à gré, avec des écarts importants d'une commission scolaire à l'autre à l'égard du coût par kilomètre. Par exemple, pour un autobus de 12 rangées, les prix variaient de 2,19 \$ à 5,93 \$ (Vérificateur général de Québec, 2011).

Tableau 1.1 Évolution du coût du transport scolaire entre 2008 et 2013 dans les commissions scolaires du Québec (MELS, 2014)

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Budgets	562 659 785 \$	567 140 077 \$	578 569 917 \$	597 803 878 \$	616 544 202 \$
Dépenses	572 363 574 \$	579 288 153 \$	591 919 258 \$	614 286 241 \$	626 308 799 \$
Surplus (déficit) net	(9 703 789 \$)	(12 148 076 \$)	(13 349 341 \$)	(16 482 363 \$)	(9 764 597 \$)

De plus, la gestion du transport scolaire est aujourd'hui un défi de taille en raison de l'explosion des demandes des familles à la suite de l'expansion des territoires, associée à

la dispersion de la population, les demandes de changement d'adresse en cours d'année scolaire, la décomposition et la recomposition des familles, les gardes partagées et les soucis liés à la sécurité.

Aussi, l'enjeu environnemental est présent plus que jamais dans le processus de prise de décision des gestionnaires. En effet, le transport scolaire contribue aux émissions de gaz à effet de serre. Pour une commission scolaire moyenne, cela représente environ 20 000 km parcourus par jour (MELS, 2014). Au Québec, en 2012-2013, plus de 520 000 élèves ont utilisé le transport scolaire matin et soir, ce qui représente 61,7% des élèves inscrits dans les commissions scolaires (MELS, 2014). Ce transport est assuré par 10 000 véhicules qui parcourent près d'un million de kilomètres chaque jour. Les tableaux 1.1 et 1.2 présentent l'évolution du nombre des élèves transportés et les coûts associés de 2008 à 2013 (MELS, 2014).

Tableau 1.2 Évolution du nombre des élèves transportés entre 2008 et 2013 dans les commissions scolaires du Québec (MELS, 2014)

	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013
Élèves transportés	549 494	540 324	533 191	528 053	520 750
Total des élèves	879 751	861 973	850 514	845 030	844 302
Pourcentage des élèves transportés	62,5%	62,7%	62,7%	62,5%	61,7%

Il est à noter que malgré la baisse du nombre des élèves transportés, les coûts de dépenses n'ont pas cessé d'augmenter, excluant ainsi le facteur démographique des causes de l'augmentation des coûts.

Actuellement, les commissions scolaires utilisent majoritairement le logiciel de gestion du transport scolaire Géobus, conçu et distribué par GRICS. Ce logiciel utilise des bases de données associées à une interface graphique permettant de visualiser le réseau routier du territoire et les données de transport, d'afficher les localisations des écoles et

d'imprimer des listes d'élèves et des statistiques. Ce logiciel utilise des données géographiques provenant d'autres bases géographiques standardisées et cartes fournies par des fournisseurs, tels que Mapinfo et Arcinfo. Les commissions scolaires assurent l'acquisition et la mise à jour de ces cartes, alors que l'affichage graphique est assuré par Geomedia.

Les numéros civiques des résidences des élèves sont positionnés géographiquement sur les cartes et ces positions sont utilisées pour planifier le transport. Géobus peut communiquer avec d'autres logiciels, comme GPI, qui gère la base de données des élèves inscrits et AVANT-GARDE pour la gestion des services de garde. Les employés responsables de la gestion du transport scolaire doivent configurer Géobus en entrant les données relatives aux écoles, les arrêts de bus à visiter et les zones desservies par chacune. Le logiciel effectue l'affectation des nouveaux élèves ou ceux qui ont changé d'adresse vers l'arrêt le plus proche de leur résidence, pour les élèves habitants à plus de 1600 mètres de leur école. Il faut noter que Géobus attribue un embarquement à domicile en cas d'absence d'arrêt à l'intérieur d'une certaine limite de marche (généralement 400 mètres pour les élèves du primaire et 600 mètres pour les élèves du secondaire).

En cas de violation de certaines contraintes, comme le dépassement de capacité de l'autobus ou un conflit horaire, le logiciel les fait ressortir. Les employés responsables sont amenés à examiner les parcours, valider certains dépassements mineurs de contraintes ou procéder au réaménagement des parcours manuellement. Une fois les parcours définis, le logiciel permet de lancer une fonction de séquençement, c'est-à-dire une réorganisation de l'ordre des arrêts à visiter, dans le but de minimiser la distance parcourue.

Les commissions scolaires désignent par un parcours le chemin parcouru par un autobus pour transporter un nombre d'élèves vers une école. Chaque autobus assure le transport de quatre parcours qui constituent un circuit. L'optimisation du circuit par l'augmentation du taux d'occupation et la baisse du nombre des voyages de retour sans élèves se fait manuellement par les gestionnaires.

La figure 1.1 présente un résumé des fonctions du logiciel GEOBUS.

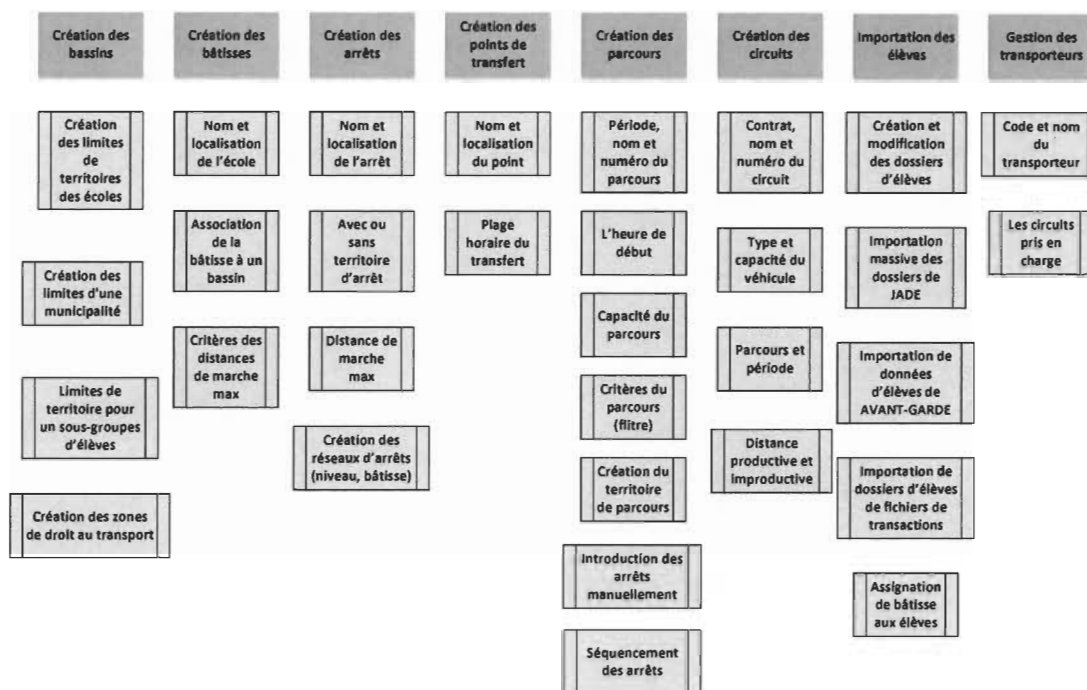


Figure 1.1 Fonctionnalités du logiciel GEOBUS

1.2. Objectif de la recherche

Dans ce mémoire, le problème de la gestion du transport scolaire est abordé. L'objectif principal est de proposer une méthodologie pour vérifier et mesurer les impacts de deux changements dans la façon de planifier le transport scolaire, soit 1) au niveau du regroupement des arrêts d'autobus et 2) au niveau de la variation de la distance de marche maximale de l'élève vers son arrêt. L'impact est mesuré sur le plan économique avec l'indicateur de consommation du carburant, taux de dégradation des pneus et freins et le temps total du voyage, sur le plan environnemental avec l'indicateur d'émissions des GES et sur le plan de la santé des élèves avec l'indicateur du transport actif.

Afin de répondre à cet objectif, ce mémoire propose, dans un premier temps, un modèle optimisé de sélection des arrêts et de routage, permettant de réduire le nombre d'arrêts visités par les autobus, plutôt que de choisir systématiquement l'arrêt existant le plus près de la résidence de chaque élève. Dans un deuxième temps, une analyse de l'impact de

cette optimisation est proposée, du point de vue économique, environnemental et par rapport à la santé des élèves, en modifiant progressivement la distance maximale de marche entre la résidence de l'élève et son arrêt d'autobus. Pour faciliter l'analyse des résultats, un outil de calcul a été développé, dont la fonction principale est de fournir des taux de variation des indicateurs de performance de n'importe quelle solution de transport.

Ce mémoire propose une recherche quantitative de type appliquée, en visant à montrer que l'optimisation du regroupement des arrêts et l'augmentation de la distance de marche améliorent l'efficacité du transport scolaire, en réduisant le nombre d'arrêts d'autobus, en minimisant le temps de transport, en diminuant les émissions des GES, et en améliorant le transport actif. Par cette recherche, on cherche à répondre à un enjeu actuel, soit l'amélioration de l'efficacité d'un service de transport dans l'éducation publique.

1.3. Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres distincts. Outre le premier chapitre présentant le contexte et l'objectif de recherche, le second chapitre présente une recension des écrits divisés en trois parties, soit le SBRP, les méthodologies de résolution développées et les indicateurs de performance recensés. Le troisième chapitre présente la méthodologie proposée pour mesurer l'impact du regroupement des arrêts et de la variation de la distance maximale de marche. Les étapes de la méthode proposée sont présentées en détail, avec une démonstration sur une instance exemple pour distinguer la méthode de résolution utilisée actuellement dans les commissions (dite méthode actuelle) et la méthode optimisée proposée. Ensuite, la distance maximale de marche est modifiée pour générer plusieurs solutions de transport. Le calcul des indicateurs de performance est par la suite réalisé. Dans le quatrième chapitre, la méthodologie proposée est appliquée à une instance plus grande et les résultats sont présentés et analysés. Finalement, une conclusion est présentée, incluant des propositions d'améliorations futures et les limites du mémoire.

CHAPITRE 2 RECENSION DES ÉCRITS

Le SBRP est un problème très étudié dans la littérature, et ce, depuis une quarantaine d'années. Dérivé du *Vehicle Routing Problem* (VRP), le SBRP couvre une grande famille de problèmes de gestion du transport scolaire, comme ceux avec ou sans fenêtre de temps, objectif simple ou multiple, ou autres (Park et Kim 2010).

Le SBRP est un problème de type NP difficile (*no-deterministic polynomial, hard*), soit appartenant à une catégorie de problème qui ne peut pas être résolu dans un temps polynomial par rapport à la taille des entrées (Lenstra, 1984). Ainsi, les problèmes de type SBRP peuvent être résolus par des approches exactes qui explorent de façon exhaustive toutes les combinaisons possibles, jusqu'à trouver la solution optimale, mais pour une certaine taille de problème, ces approches font face à une explosion du nombre de possibilités, rendant trop important le temps de calcul. Pour tenter de contourner ce problème, il est possible d'utiliser des heuristiques ou d'en développer de nouvelles. Le principe d'une heuristique est de proposer une structure de l'espace combinatoire sous forme d'un arbre avec un ordre d'agencement. Ces heuristiques ne réduisent pas toujours suffisamment l'effet combinatoire, d'où l'utilisation des métaheuristiques qui examinent une zone en particulier de l'espace et identifient une solution faisable, appelée la phase d'intensification, puis se déplacent vers une autre zone pour trouver une autre solution, appelée la phase de diversification, avec un effet de hasard pour éviter de rester à un minimum local. Même s'ils ne garantissent pas l'optimalité, les métaheuristiques assurent quand même une recherche plus large, avec un meilleur compromis au point de vue de justesse et de délai (Wu et al., 2012). Dans ce chapitre, il est question de l'historique du problème du transport scolaire, incluant les origines, les dérivés du problème, les recherches antérieures, la formulation mathématique et les méthodes de résolution.

2.1. Le problème du transport scolaire

2.1.1. Historique du SBRP

Le problème du voyageur de commerce (*Traveling Sales-man Problem* – TSP) est le plus ancien et le plus connu des problèmes dans la recherche opérationnelle, étudié depuis le 19^e siècle par William Rowan Hamilton. Ce dernier a tenté de répondre à une problématique rencontrée par un vendeur qui devait visiter une série de villes une seule fois et revenir à son point de départ en parcourant la trajectoire la plus courte (Ghiani, 2000). C'est un problème NP difficile, car trouver l'ordre pour des villes à visiter quand il s'agit de 5 villes est synonyme de trouver le chemin le plus court entre 120 possibilités. Par contre, lorsqu'on double le nombre de villes (10), ce sont plutôt 3 628 800 chemins possibles qu'on retrouve (Newton et Thomas, 1969).

Le problème de tournées de véhicules (*Vehicle Routing Problem* – VRP) est un dérivé du TSP. Il s'agit d'une flotte de véhicules localisée à un point de départ, où on doit visiter un certain nombre de clients pour la livraison d'objets, afin de minimiser la distance totale. Le VRP introduit la notion de la capacité de la flotte à ne pas dépasser, qui peut être homogène ou hétérogène, et la quantité de la demande des clients à satisfaire. Chaque tournée de véhicule de la flotte doit débuter et finir au point de départ (Caric et al., 2007).

Plusieurs variantes se sont développées à partir du VRP, par l'ajout ou la combinaison de contraintes. On trouve par exemple le problème de tournées de véhicules avec fenêtre de temps (*Vehicle Routing Problem with Time Window* – VRPTW), où le client doit être servi à l'intérieur d'un intervalle de temps (Desrochets et al. 1992). On retrouve aussi le problème de tournées de véhicules multi points de chute (*Multi-Depot Vehicle Routing Problem* – MDVRP), où les clients doivent être affectés à un point et servis par l'un des véhicules basés dans les alentours (Montoya-Torres et al., 2015). On retrouve le problème de tournées de véhicules avec la combinaison de la gestion des points d'embarquement, de débarquements et la fenêtre de temps (*Vehicle Routing Problem with Simulation Pickup and Delivery and Time Window* – VRSPDTW). Ce genre de problème combine la contrainte de la fenêtre du temps et celle de l'emplacement des entrepôts (Wang et al.,

2015). Puis, le problème du transport scolaire (*School Bus Routing Problem – SBRP*) vise la planification des tournées d'une flotte d'autobus scolaires, où chaque autobus doit ramasser des élèves de différents arrêts pour les transporter vers leur école. Le tout doit respecter la durée du voyage maximal d'un élève, la capacité maximale d'un autobus et la fenêtre de temps pour l'embarquement et le débarquement (Martínez et al. 2010).

Rashidi et al. (2009) précisent que le problème du SBRP est une variante du problème des tournées de véhicules avec capacité dans lequel les élèves sont regroupés puis affectés à des arrêts. Le véhicule doit visiter une seule fois les arrêts, et le circuit ne prend fin que quand tous les élèves sont transportés (Rashidi et al., 2009).

2.1.2. Recherches antérieures sur le SBRP

Les approches utilisées diffèrent beaucoup d'un auteur à l'autre. Que ce soit au niveau des contraintes considérées, de l'objectif visé, de la taille de l'échantillon, de l'algorithme utilisé, ou de l'étape du SBRP considérée.

En 1969, Newton et Thomas proposaient une méthode pour générer des parcours d'autobus scolaires et des horaires par ordinateur. Ils ont d'abord proposé une formulation en nombres entiers. Avec seulement 20 origines et 100 arrêts à visiter, ils ont identifié 213840 variables et $40 \times (98 !)$ contraintes (Newton et Thomas, 1969).

Dû au temps de calcul trop élevé, il était nécessaire de trouver d'autres méthodes de résolution. La procédure proposée par l'auteur est basée sur deux étapes, soit l'utilisation d'une heuristique du voisin le plus proche pour créer des routes et l'utilisation d'un algorithme A, qui effectue des itérations sur la solution initiale pour l'améliorer. À chaque itération, un contrôle des contraintes, comme la capacité des autobus et le délai maximal du voyage, est fait. Une des limites de cette méthode est la capacité des autobus qui est supposée homogène et les routes qui sont créées par école, c'est-à-dire que l'autobus ne ramasse que les élèves de la même école, plus communément appelé charge unique.

Li et Fu (2002) soulignent qu'il n'y a pas d'approche unique pour l'étude du SBRP et ajoutent que les méthodes de résolution dépendent du contexte du problème. Park et al.

(2010) présentent deux stratégies qui reviennent à plusieurs reprises dans les écrits. La première stratégie est le LAR (*Location Allocation Routing*), qui consiste à sélectionner des arrêts (*location*), puis à affecter les élèves aux arrêts (*allocation*). Ensuite, on regroupe les arrêts pour créer des routes et parcours (*routing*). Cette stratégie était choisie par Bodin et Berman (1979), Dulac et al. (1980) et Desrosiers et al. (1984). La deuxième stratégie, l'ARL (*Allocation Routing Location*), consiste à constituer des groupes géographiques, où chaque regroupement contient un nombre d'élèves qui correspond à la capacité des autobus (*allocation*). On sélectionne par la suite des arrêts pour créer des routes (*routing*), et enfin, on affecte les élèves aux arrêts (*location*). Ledesma et al. (2013) et Kinable et al. (2013) ont utilisé la méthode ARL. Par contre, selon la même source, la méthode LAR a tendance de créer plus de routes, car elle ne tient pas compte de l'effet de la répartition des élèves par rapport à la capacité des autobus.

Park et Kim (2010) proposent une stratégie en cinq étapes, soit la préparation des données, la sélection des arrêts d'autobus, la génération des parcours par le regroupement des arrêts, le réglage de la plage des temps des écoles et l'ordonnancement des autobus. Selon ces auteurs, peu de chercheurs se sont intéressés à la sélection des arrêts.

La caractéristique du type de la charge est aussi une caractéristique importante présente dans la littérature liée au SBRP. Elle peut être simple, c'est-à-dire qu'on ne transporte, dans le même autobus que les élèves de la même école, ou bien mixte, qui signifie qu'on peut accepter le transport des élèves de plusieurs écoles en même temps. Cette dernière fut introduite et étudiée par Bodin et Berman (1979). Braca et al. (1997) furent les précurseurs qui ont développé une approche informatique pour la charge mixte par la proposition d'une heuristique modifiée. Leur problème comprend la capacité, la distance et la fenêtre de temps pour les écoles, la contrainte de temps maximal du voyage et, pour la première fois dans les SBRP deux contraintes furent ajoutées, soit le nombre minimal d'élèves par voyage et une heure minimal de visite (par exemple pas avant 7h00).

2.1.3. Synthèse de recension des écrits sur le SBRP

Pour illustrer la diversité des approches de résolution, les tableau 2.2 et 2.3 présentent une récapitulation des travaux d'un certain nombre de chercheurs qui ont abordé le SBRP. Il a été complété à partir de celui présenté par Park et Kim (2010). Le tableau 2.1 présente un résumé des caractéristiques des modèles de résolution de problème de type SBRP (Park et Kim, 2010).

Tableau 2.1 Les caractéristiques d'un SBRP (Park et Kim, 2010)

NOMBRE D'ÉCOLES	A. ÉCOLE UNIQUE
	B. Multiple
TYPE DE ZONE	A. Urbaine
	B. Rurale
TYPE DE CHARGE	A. Charge mixte autorisée
	B. Charge mixte non autorisée
TYPE DE LA FLOTTE	A. Flotte homogène (HO)
	B. Flotte hétérogène (HT)
OBJECTIFS	A. Nombre d'autobus utilisés (N)
	B. La distance totale ou délai des voyages (TBD)
	C. La distance ou temps total du voyage de l'élève (TSD)
	D. La distance de marche de l'élève (SWD)
	E. L'équilibrage de la charge (LB)
	F. Borne supérieure de la route (MRL)
	G. Le temps d'attente de l'élève (TL)
CONTRAINTES	A. La capacité des autobus (C)
	B. Le maximum du temps de voyage (MRT)
	C. Plage horaire de l'école (TW)
	D. La distance ou le temps maximum de marche (MWT)
	E. Temps au plutôt d'embarquement (EPT)
	F. Borne inférieure du nombre d'élèves pour créer une route (MSN)

Tableau 2.2 Tableau récapitulatif des travaux sur le SBRP (complété à partir de Park et Kim, 2010)

Référence	Type d'école	Urbain/rural	Charge mixte	Flotte	Objectifs	Contraintes	Taille du problème
Newton et Thomas (1969)	Unique	Urbain	Non	Homogène	Pas spécifié	C, MRT	50 à 80 arrêts
Angel et al. (1972)	Multiple	Urbain	Non	HO	N, TBD	C, MRT	1500 élèves
Bennett and Gazis (1972)	Unique	Urbain	Non	HO	TBD, TSD	C	256 arrêts
Newton et Thomas (1974)	Multiple	Urbain	Non	HO	N, TBD	C, MRT	1097 élèves, 76 arrêts
Verderber (1974)	Multiple	Urbain	Non	HO	N, TBD	C, MRT	11,000 élèves
Gavish and Shlifer (1979)	Unique	Urbain	Non	HO	N, TBD	C, MRT	21 arrêts
Bodin and Berman (1979)	Multiple	Urbain	Non	HO	N	C, MRT, TW	13,000 élèves
Dulac et al. (1980)	Unique	Urbain	Non	HO	N, TBD	C, MRT, MWT	585 élèves, 99 arrêts
Desrosiers et al. (1981, 1986a)	Multiple	Les deux	Non	HO	N, TBD	C, MRT, MWT	environ 16,000 élèves
Hargroves and Demetsky (1981)	Multiple	Urbain	Oui	HT	N, TBD	C, MRT, MSN	8537 élèves
Swersey and Ballard (1984)	Multiple	Urbain	Non	HO	N	TW	37 écoles
Chapleau et al. (1985)	Unique	Urbain	Non	HO	N, SWD	C, MRT	2079 élèves
Russell and Morrel (1986)	Multiple	Urbain	Oui	HO	TBD	C, MRT	140 élèves
Chen et al. (1990)	Multiple	Rural	Oui	HO	N, TBD	C, MRT	2413 élèves
Thangiah and Nygard (1992)	Unique	Rural	Non		N, TBD, TSD	C, MRT	353 élèves
Bowerman et al. (1995)	Unique	Urbain	Non	HO	N, SWD, LB	C, MWT	138 élèves

Tableau 2.3 Tableau récapitulatif des travaux sur le SBRP (complété à partir de Park et Kim, 2010) (suite)

Référence	Type d'école	Urbain/rural	Charge mixte	La flotte	Objectifs	Contraintes	Taille du problème
Braca et al. (1997)	Multiple	Urbain	Oui	HO	N	C, MRT, TW, EPT	838 arrêts, 73 écoles
Corberán et al. (2002)	Unique	Rural	Non	HO	N, MRL	C	55 arrêts
Li and Fu (2002)	Unique	Urbain	Non		N, TBD, TSD, LB	C	86 élèves, 54 arrêts
Ripplinger (2005)	Unique	Rural	Nou		N, TBD	C, MRT	131 élèves
Spada, Bierlaire et al. (2005)	Multiple	Rural	Oui		TL	C, TW	274 élèves
Schittekat et al. (2006)	Unique	Urbain	Non	HO	TBD	C	50 élèves, 10 arrêts
Bektas and Elmastas (2007)	Unique	Urbain	Non	HO	N, TBD	C, MRT	519 élèves
Fügenschuh (2009)	Multiple	Rural	Non		N, TBD	TW Range	102 écoles
De Souza et Siqueira (2010)	Multiple	Urbain	Oui	Ht	TBD, SWD		10 de 399 villes
Van Moffaert, et al. (2011)	Unique	Urbain	Non	Ht	TBD		Des instances set
Kim, Kim et al. (2012)	Multiple	Urbain	Oui	Ho	N, TBD	C	515 arrêt, 13817 élèves, 110 écoles
Park, Tae et al. (2012)	multiple	Urbain	Oui	Ho et Ht	N	C, MRT, TW	200-2000 arrêts et 5 à 90 écoles
Euchi and Mraïhi (2012)	Unique	Urbain	Non	Ho	TBD	C	Des instances
Schittekat, Kinable et al. (2013)	Multiple	Urbain	Oui	Homogène	TBD	C	3000 et 7 Écoles
Riera-Ledesma and Salazar-González (2013)	Unique	Urbain	Non	Homogène	TBD, SWD	C, MRT	instances
Kinable, Spieksma et al. (2014)	Unique	Urbain	Non	Homogène	TBD	MRT	800 élèves et 40 arrêts

2.2. Étapes de résolution du SBRP

Les chercheurs qui ont contribué aux écrits relatifs au SBRP ne proposent pas une méthode de résolution unique, capable de fournir une solution à tous les problèmes et efficace en termes de temps de réponse. Par contre, il est possible de ressortir les étapes du SBRP qui reviennent le plus souvent (figure 2.1), soit la collecte de données, le regroupement, la sélection des arrêts, le routage et la planification. Les différentes approches proposées par les chercheurs couvrant généralement une ou plusieurs phases, mais rarement toutes.

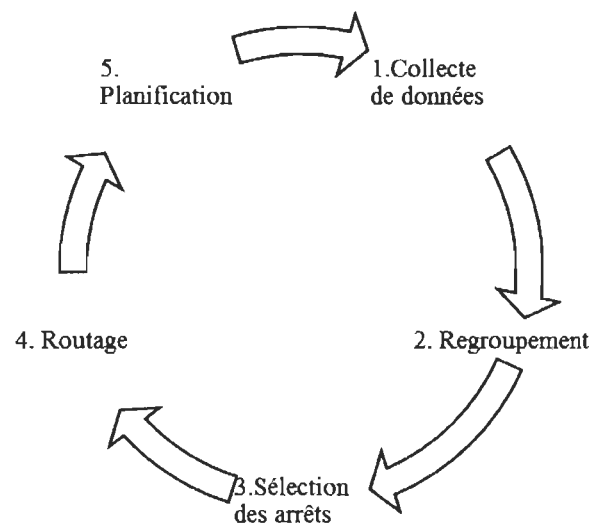


Figure 2.1 Les 5 étapes de résolution du SBRP

2.2.1. Collecte de données

Cette phase consiste à identifier les variables de décision, les contraintes à respecter et les constantes. Dans la recension des écrits, on distingue trois sortes d'approches. La première vise des cas issus de la réalité avec leurs contextes spécifiques, comme Bektaş et Elmastaş (2007) qui ont traité le cas d'une école primaire qui se trouve à Ankara en Turquie. La deuxième consiste à appliquer un modèle développé sur des cas artificiels (*SBRP-instances*). Par exemple, Kinable et al. (2013) ont appliqué leur modèle sur des instances développées par l'Université d'Antwerp en Belgique. Ces instances sont générées de façon aléatoire et de tailles différentes. La troisième approche combine les deux premières,

c'est-à-dire utiliser les instances pour valider le modèle et faire l'évaluation de la qualité des résultats obtenus, puis l'appliquer sur des données réelles. Par exemple, Euchi et Mraïhi (2012) ont étudié le cas du transport scolaire d'une école à Tunis en Tunisie et ont fait la validation en utilisant leur modèle sur les instances développées par Diaz-Parra et al. (2012).

De façon à fournir un grand nombre d'instances différentes pour tester des algorithmes différents, des chercheurs ont développé des générateurs d'instance pour le SBRP. Par exemple, le générateur de l'Université d'Antwerp nécessite 4 paramètres :

- le nombre d'arrêts potentiels ;
- le nombre d'élèves et leur emplacement ;
- la capacité des autobus (homogène) ;
- la distance de marche maximale.

Pour ce générateur, les instances sont générées sur le plan euclidien défini par le rectangle délimité par les points $(0, 0)$ et (x_{\max}, y_{\max}) . Elles sont disponibles et peuvent être téléchargées à partir du lien suivant : <http://antor.ua.ac.be/schoolbus-routing>.

D'autres instances sont utilisées par les chercheurs. Par exemple, on cite les SBRPLIB de Diaz et al. (2012), qui ont généré 24 SBRP-instances, avec cette fois-ci huit caractéristiques incluant le nombre d'écoles, l'environnement du service (rural ou urbain) et la taille des autobus utilisés.

2.2.2. Regroupement

La phase de regroupement (en anglais *clustering*) consiste à constituer des groupes de la même taille que la capacité des autobus. Chaque regroupement est représenté par un centroïde, soit un point imaginaire qui a comme abscisse la moyenne des abscisses du regroupement et comme ordonnée la moyenne des ordonnées du groupe. En plus de la contrainte de la taille, une autre contrainte de proximité doit être respectée, soit qu'il faut que le centroïde d'un regroupement soit le plus proche des points de ce même regroupement que les autres centroïdes (Xu et al., 2008).

2.2.2.1. Formulation mathématique du regroupement

Pour le problème de regroupement, Chamroukhi et al. (2014) proposent les paramètres (tableau 2.4) et la formulation mathématique suivante :

Tableau 2.4 Les paramètres de modélisation du regroupement

Constantes	Description
x_i	L'ensemble des élèves i
n	Nombre d'élèves
μ_k	Centroïde du regroupement k
K	Le nombre total de regroupements
t	Numéro de l'itération
Variables de décision	Description
z_{ik}	1 si l'élève « i » est affecté au regroupement k à la fin, 0 sinon
z_{ik}^t	1 si l'élève « i » est affecté au regroupement k à l'itération « t », 0 sinon

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n z_{ik} \|x_i - \mu_k\|^2$$

Avec :

$$\|x_i - \mu_k\|^2 = d(x_i, \mu_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_{ij} - \mu_{kj})^2} \quad \forall k = 1, \dots, K$$

$$z_{ik}^{(t+1)} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = \arg \min \|x_i - \mu_k\|^2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\mu_k^{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ik}^{(t)} x_i}{\sum_{i=1}^n z_{ik}^{(t)}}$$

$$z'_{ik} = \{0,1\}$$

2.2.2.2. Résolution du regroupement

Vidal et al. (2014) présentent deux algorithmes qui sont des métaheuristiques hybrides utilisées alternativement pour résoudre le problème du regroupement. Le premier est basé sur une manipulation des coordonnées cartésiennes (*k-means algorithm*) et le deuxième est basé sur les coordonnées cylindriques (*angular algorithm*).

Xu et al. (2008) ont proposé un algorithme basé sur les centroïdes pour résoudre un VRP. Il est constitué de trois phases : la construction des groupes, l'ajustement des groupes et l'établissement du routage. À la phase de construction du regroupement, le point (client) le plus éloigné du dépôt est sélectionné comme une source pour former le premier regroupement. Ce point est donc considéré par les auteurs comme le point critique. Puis, le centroïde du regroupement est calculé à partir des coordonnées de ce point. Ensuite, un second point est choisi parmi les points non regroupés en fonction de sa distance au centroïde. Un recalcul du nouveau centroïde est fait à l'aide de la moyenne des coordonnées des deux points avant de choisir le point suivant. Cette itération est répétée jusqu'à atteindre la capacité du véhicule pour créer un nouveau regroupement.

Une fois les groupes constitués, la phase des ajustements commence. Il s'agit de vérifier chaque point d'un regroupement. S'il est plus proche d'un autre regroupement que le sien, il est transféré vers ce nouveau regroupement, à condition qu'il n'y ait pas de violation de capacité des autobus. Un recalcul des centroïdes est fait après chaque transfert effectué.

2.2.3. Sélection des arrêts

Ledesma et al. (2012) ont fait la distinction entre la sélection des arrêts et l'assignation des élèves. La sélection des arrêts consiste à identifier un nombre d'arrêts atteignables par un élève et l'assignation des élèves est l'affectation de l'arrêt le plus proche à l'élève, mais sans dépasser la capacité de l'autobus et le nombre d'élèves maximal par arrêt.

Dulac et al. (1979) et Bodin et Berman (1980) ont sélectionné les arrêts les plus proches aux élèves, Martinez et al. (2010) ont créé un algorithme pour sélectionner les arrêts plus

l'assignation, de sorte à minimiser le temps de marche des élèves vers leurs arrêts. Schittekat et al. (2013) ont développé une métaheuristique pour résoudre la phase de sélection des arrêts, mais intégrée dans la phase de routage (la phase suivante), avec comme fonction objectif la réduction de la distance totale parcourue par les autobus. Pour la partie de l'assignation des élèves, un sous-programme est développé pour affecter les élèves aux arrêts.

Bowerman et al. (1994) ont utilisé l'heuristique de Kolesar-Walker (1974) pour résoudre le problème de la sélection des arrêts comme un problème de recouvrement d'ensemble (*Set Covering Problem- SCP*). Cet algorithme sélectionne les arrêts avec le plus grand nombre d'élèves accessibles parmi les élèves non affectés tout en respectant la distance de marche maximale.

Le problème de recouvrement d'ensemble est un problème combinatoire fondamental dans la recherche opérationnelle de type NP-difficile. Il a généralement comme objectif de trouver pour une matrice de recouvrement de M rangées et de N colonnes, un sous-ensemble avec le minimum de colonnes (Lan et al., 2005).

2.2.3.1. Formulation mathématique de la sélection des arrêts

Selon Lan et al. (2005), on peut formuler le problème du SCP de la manière suivante :

T = l'ensemble des élèves

D = l'ensemble des arrêts

$Y_i = 1$ si l'arrêt i est retenu, 0 sinon

$X_{ij} = 1$ si l'assignation de l'élève j à l'arrêt i est possible, 0 sinon

$$\min \sum_{i \in D} Y_i \tag{1}$$

Sujet à :

$$\sum_{i \in D} X_{i,j} Y_i \geq 1 \quad \forall j \in T \quad (2)$$

$$X_{i,j} \text{ et } Y_i \in \{0,1\} \quad (3)$$

2.2.3.2. Résolution de la sélection des arrêts

Pour les SBRP de moyennes et grandes tailles, la résolution du problème de la sélection des arrêts se fait par l'utilisation d'algorithmes ou de métaheuristiques. Laporte et al. (1996) définissent une métaheuristique, qui est la composition des mots heuristique (qui signifie « trouver ») et méta (qui signifie « dans un niveau supérieur »), comme un processus de génération itérative qui guide une heuristique subordonnée en combinant intelligemment différents concepts pour explorer et exploiter un espace de recherche. Des stratégies de recherche et d'apprentissage sont utilisées pour structurer l'information afin de trouver rapidement de très bonnes solutions.

Selon Dridi et al. (2010), on peut classer les métaheuristiques selon certaines caractéristiques, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes ne garantissent pas l'optimalité, mais fournissent le meilleur compromis entre la qualité de la solution et la durée d'exécution. Au fil du temps, elles ont été adaptées à une large gamme de problèmes, mais exigent un niveau de connaissance avancé, pour être en mesure de choisir les méthodes les mieux adaptées au problème étudié (Dridi et al., 2010).

2.2.4. Routage

La phase de routage (*routing* en anglais) consiste en la création de routes qui relient les arrêts. Selon Bodin et al. (2001), si on renverse l'ordre des phases de routage et de regroupement, les routes vont être courtes et nombreuses, alors que le taux d'occupation des autobus sera faible. Par contre, si le regroupement est en premier et le routage est en second, on aura moins de routes, avec une meilleure occupation des autobus.

2.2.4.1. Formulation mathématique du routage

Le tableau 2.5 présente les paramètres de base des modèles de routage issus de la littérature. Ce sont les variables de décision ainsi que les paramètres et les données du problème, qui vont être utilisés pour la formulation mathématique du routage.

Tableau 2.5 Les paramètres de modélisation du routage

Constantes	Description
C_k	Capacité de l'autobus k
A	Ensemble des arrêts d'autobus (A_0 correspond à l'école)
Z_k	Coût annuel d'un autobus k
D	Ensemble des élèves
C_{ij}	Coût de transport entre l'arrêt i et l'arrêt j
Variables de décision	Description
X_{ijk}	1 si l'autobus k utilise le segment de l'arrêt i vers l'arrêt j , sinon 0.
B_{ik}	1 si l'autobus k s'arrête à i , sinon 0.
T_{ilk}	1 si l'élève « l » utilise l'autobus k à l'arrêt i , sinon 0.
Y_k	1 si l'autobus k est utilisé

Voici la modélisation mathématique proposée par Ledesma et González (2013) :

$$\min \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} C_{ij} * \sum_{k=1}^n X_{ijk} + \sum_{k=1}^n Y_k * \sum_{k=1}^n Z_k \quad (1)$$

Sujet à :

$$\sum_{k=1}^n X_{ijk} = \sum_{k=1}^n X_{jik} = B_{ik} \quad \forall i \in A \quad (2)$$

$$\sum_{i,j \in A} X_{ijk} \leq A - 1 \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n B_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in A \mid \{0\} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n T_{ilk} \leq c_{il} \quad \forall l \in D, \forall i \in A \quad (5)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in A} T_{ilk} \leq C_k \quad \text{où } k = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$T_{ilk} \leq B_{ilk} \quad \forall i, l, k \quad (7)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in A} T_{ilk} = 1 \quad \forall l \in D \quad (8)$$

$$B_{ik} \in \{0,1\} \quad k = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad i, j \in A, i \neq j, k = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$T_{ilk} \in \{0,1\} \quad i, j \in A, i \neq j, l \in D \quad (11)$$

Bektaş et Elmastaş (2007) ont choisi comme fonction objectif la minimisation de la somme du coût du voyage selon la longueur totale parcourue et les coûts annuels fixes dus aux autobus scolaires utilisés. Pour les contraintes, on en retrouve deux pour garantir que les autobus qui partent arrivent bien à destination, deux autres pour garantir qu'un arrêt ne soit visité qu'une seule fois, une autre en lien avec la capacité des autobus et une autre pour la distance maximale de voyage.

Dans le cas de Schittekat et al. (2013), la fonction objectif est la minimisation de la distance parcourue, avec une contrainte de continuité, pour s'assurer qu'un autobus qui visite un arrêt doit aussi en ressortir, à l'exception de l'arrêt final (l'école). Une autre contrainte est utilisée pour imposer la connexion de tous les arrêts pour former un seul parcours. Une autre contrainte garantit que chaque arrêt est visité une seule fois au maximum, sauf pour l'arrêt correspondant à l'école. Aussi, une contrainte est utilisée pour s'assurer que chaque élève est ramassé d'un arrêt qu'il peut atteindre de sa résidence par la marche. S'ajoute à cela une contrainte de la capacité des autobus et du nombre d'élèves

à ne pas dépasser, une contrainte qui impose qu'un élève ne puisse pas être ramassé à un arrêt par un autobus qui ne visite pas cet arrêt, et une dernière contrainte qui impose que chaque élève soit embarqué une seule fois.

Ledesma et González (2013) et Bektaş et Elmastaş (2007) proposent une fonction objectif qui minimise le coût de routage, c'est-à-dire les coûts associés au transport et le coût d'affectation selon la catégorie de l'autobus. Pour les contraintes, on y trouve les contraintes de connexion, une contrainte pour embarquer chaque élève une seule fois, une contrainte qui garantit qu'un élève ne peut pas être pris si son arrêt n'est pas visité et une contrainte de capacité des autobus.

Dans Pacheco et Martí (2006), la fonction objectif est la minimisation du nombre d'autobus (M) et la minimisation du temps de voyage (t_{max}). Ces deux objectifs sont en conflit, car une solution qui minimise le nombre d'autobus aura une tendance à augmenter le temps de déplacement maximal. Dans cet article, les auteurs ont suivi une approche multi objectifs, c'est-à-dire qu'ils tentent de résoudre le problème par rapport aux deux objectifs séparément et de donner au décideur un ensemble de solutions qui représentent le meilleur service possible à un coût donné. Ainsi, leur modèle de résolution consiste à minimiser le deuxième objectif, qui est la longueur maximale d'un parcours, pour chaque nombre d'autobus possible, qui est le premier objectif.

2.2.4.2. Résolution du problème du routage

Quand il s'agit d'un SBRP de petite taille, la résolution de ce modèle peut se faire avec la programmation linéaire. Par exemple, Martinez et al. (2010) ont résolu leur problème avec l'utilisation du logiciel Geomedia Professional 6.1 et Xpress 7.1. De leur côté, Bektaş et Elmastaş (2007) ont fait appel au *CPLEX 8.0*.

Shin et al. (2012) ont réalisé le routage après le regroupement, en considérant chaque regroupement comme un problème de type TSP. Puis, ils ont utilisé l'algorithme de Lin-Kernighan pour le résoudre. Santana et al. (2015) ont proposé de résoudre la phase de routage comme un VRPTW en deux étapes. La première étape consiste à résoudre le VRPTW pour chaque regroupement, alors que la deuxième étape fournit pour l'ensemble

des routes la séquence des arrêts pour ramasser les élèves dans leur regroupement respectif.

Bramel et al. (1997) et Spada et al. (2005) ont développé une métaheuristique utilisant la recherche tabou, qui consiste à mémoriser les configurations ou régions visitées et à introduire des mécanismes permettant d'interdire à la recherche de retourner trop rapidement vers ces configurations. Ces mécanismes sont des interdictions temporaires de certains mouvements (mouvements tabous). Il s'agit d'interdire les mouvements qui risqueraient de tourner en boucle au tour de la même solution appelée le minimum local.

De leur côté, Euch et Mraïhi (2012) ont développé un algorithme de type colonie de fourmis (*ant colony* en anglais). Il s'agit d'une analogie du comportement des fourmis qui explore un lien inconnu entre deux points. L'ensemble de la colonie de fourmis cherche à se rendre d'un point vers un autre. En parcourant un certain nombre de trajets, chaque fourmi dépose une quantité d'une substance chimique appelée phéromone pour indiquer leur passage sur toute la longueur du parcours. À la fin de chaque itération de cet algorithme, une quantité (phéromone) est mémorisée. Au début le choix du trajet se fait aléatoire pour visiter plusieurs possibilités, mais au fur et à mesure que le processus progresse, certains parcours se distinguent par leur quantité (phéromone) déposée. Selon la somme des quantités déposées, on valide ou non le segment « i » vers « j ». L'exercice est répété jusqu'à l'arrivée à l'école.

Schittekat et al. (2013) ont utilisé l'heuristique du GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), proposée précédemment par Resende et al. (1995). Cette méthode est considérée comme une métaheuristique de construction, car elle commence par une solution nulle, qui va se compléter par itération. En supposant qu'une solution est constituée d'un ensemble de composantes, la phase constructive génère une solution pas à pas, en ajoutant à chaque étape une nouvelle composante. La composante rajoutée est choisie dans une liste de candidats d'une manière aléatoire, tout en considérant la valeur de son apport à la fonction objectif. En d'autres termes, chaque composante est évaluée à

l'aide d'un critère qui permet de mesurer le bénéfice qu'on peut espérer. La liste de candidats (*Restricted Candidate List*) contient les meilleures composantes selon ce critère.

Le choix de l'algorithme utilisé n'est pas arbitraire, mais plutôt dicté par la taille, le type du problème étudié et le besoin en matière de justesse et de rapidité.

2.2.5. Planification

La phase de planification se fait à deux niveaux. Le premier niveau consiste à déterminer l'heure de début des classes (*School bell time adjustment*), alors que le deuxième niveau correspond au calcul des heures de passage aux arrêts (*Route scheduling*). Pour l'heure de début des classes, la plupart des écrits la considèrent comme une donnée de départ et une contrainte. Cependant, d'autres chercheurs la considèrent comme une variable de décision à définir dans le but de trouver le départ optimal qui maximise le nombre de routes (Kim et al., 2010). Selon Bodin et al. (1983), la flexibilité de l'heure de début des classes est un facteur clé pour la réduction des coûts du SBRP. Fügenschuh (2009) intègre la phase de planification dans la phase de routage, en proposant un routage en fonction de la contrainte de l'horaire, à l'aide d'un algorithme développé (*p-greedy algorithm*), suivant une amélioration par la recherche locale et un ordonnancement de l'horaire, tout en permettant le transfert des élèves d'une route à l'autre.

Pour le calcul des heures de passage aux arrêts, Bramel et al. (1993) ont souligné qu'avec la contrainte de la plage horaire par arrêt (*time window*), l'analyse et l'étude deviennent plus compliquées en comparaison avec un modèle de capacité (*capacitated model*). Ils proposent un modèle de résolution en trois phases. D'abord, ils ont ignoré la fenêtre du temps de leur modèle VRPTW pour faire le routage plutôt du CVRP. Dans un deuxième temps, le premier routage va intégrer la fenêtre du temps pour devenir un modèle CVRPTW. En troisième temps, le routage est adapté pour un modèle VRPTW.

En plus des heures du début et de fin des classes, l'estimation de la vitesse de l'autobus est nécessaire. Braca et al. (1995) ont proposé deux formules pour estimer cette valeur en fonction de certains paramètres et caractéristiques de la route :

V : vitesse moyenne du trajet en miles/heure ;

x_1 : nombre de trajets sur la même direction de la route ;

x_2 : type de la route (sens unique = 0, double sens = 1) ;

x_3 : arrêt avec double position (non permis = 0, permis = 1) ;

x_4 : type de la zone (résidentiel = 0, commercial = 1).

La première méthode concerne la région de Brooklyn en New York,

$$V = 10,92 + 2,12x_1 - 2,63x_2 - 2,37x_3 - 3,25x_4$$

La deuxième méthode concerne la région de Staten Island dans la même ville,

$$V = 11,31 + 0,94x_1 - 2,318x_2 - 3,31x_3 - 4,16x_4$$

2.2.6. Synthèse des méthodes de résolution du SBRP

Les tableaux 2.6, 2.7 et 2.8 résument les différentes approches utilisées par certains chercheurs pour résoudre les différentes phases du SBRP.

Tableau 2.6 Synthèse des approches de résolution du SBRP

<i>Auteurs (année)</i>	<i>Phase 1</i>	<i>Phase 2</i>	<i>Phase 3</i>	<i>Phase 4</i>	<i>Fonction objectif</i>	<i>Outil de résolution</i>	<i>Artificiel / réel</i>
<i>Demeral et al. (2008)</i>	Sélection d'autobus	Assignation des élèves aux arrêts	Sélection des arrêts	Routage	Min. temps de voyage et coût	Algorithme développé	Réel
<i>Schittekat et al. (2013)</i>	Sélection des arrêts et routage	Assignation des élèves aux arrêts			Min. distance totale	Métaheuristique GRASP + VND	Artificiel et réel
<i>Braca et al. (1995)</i>	Sélection des arrêts et routage				Min. temps de voyage	<i>Location Based Heuristic</i> (LBH)	Réel
<i>Souza et al. (2010)</i>	Sélection des arrêts (Max la marche)	Calcul des distances entre les arrêts	Routage		Min. la distance	<i>Location Based Heuristic</i> (LBH)	Réel
<i>Ledesma et al. (2013)</i>	Sélection des arrêts et routage				Min. les coûts	algorithme BCP	Artificiel
<i>Park et al. (2012)</i>	Sélection des arrêts et routage	Assignation des autobus	Jumelage des routes		Min. le nombre d'autobus	Algorithme hongrois et algorithme <i>sweep</i>	Artificiel

Tableau 2.7 Synthèse des approches de résolution du SBRP (suite)

Auteurs (année)	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Fonction objectif	Outil de résolution	Artificiel / réel
<i>Pacheco et al.</i> (2006)	Routage				Min. le nombre d'autobus et le temps de voyage	La recherché tabou	Réel
<i>Martinez et al.</i> (2010)	Collecte des données	Sélection des arrêts et assignation des élèves	Routage		Min. le nombre d'autobus et le temps de voyage	Algorithme développé	Réel
<i>Li et al.</i> (2002)	Minimiser le nombre d'autobus	Minimiser le temps de voyage	Minimiser les temps inutiles		Min. le nombre d'autobus et le temps de voyage	L'algorithme de <i>Dijkstra</i>	Réel
<i>Kinable et al.</i> (2013)	Sélection des arrêts	Assignation des élèves aux arrêts	Routage		Min. les coûts	Algorithme développé	Artificiel
<i>Kim et al.</i> (2012)	Sélection des arrêts, routage et horaire				Min. le nombre d'autobus et la distance	Algorithme développé et Algorithme hongrois	Artificiel
<i>Fügenschuh</i> (2009)	Routage en fonction de l'horaire	Amélioration par recherche locale	Assignation de l'horaire		Min. le nombre d'autobus et le temps de voyage	<i>GRASP et VND</i>	Réel et artificiel

Tableau 2.8 Synthèse des approches de résolution du SBRP (suite)

<i>Auteurs (année)</i>	<i>Phase 1</i>	<i>Phase 2</i>	<i>Phase 3</i>	<i>Phase 4</i>	<i>Fonction objectif</i>	<i>Outil de résolution</i>	<i>Artificiel / réel</i>
<i>Eldrandaly et al. (2012)</i>	Collecte des données	Regroupement	Routage ACO et ILK		Min la distance	Algorithme de <i>Dijkstra</i>	Réel
<i>Corberan et al. (2002)</i>	Routage	procédure <i>SWAP</i>	procédure <i>INSERT</i>	procédure <i>COMBINE</i>	Min le nombre d'autobus et le temps	La recherche <i>scatter</i>	Réel
<i>Corberan et al. (2000)</i>	Routage				Min. la distance parcourue	La recherché Tabou	Artificiel
<i>Bramel et al. (1993)</i>	Routage pour CVRP	Routage pour CVRPTW	Routage pour VRPTW		Min. les coûts	<i>Location Based Heuristic</i>	Artificiel
<i>Bodin et al. (2001)</i>	Sélection des arrêts	Assignment des élèves aux arrêts	Routage	Planification	Min. le temps de voyage	Algorithme de <i>Dijkstra</i>	Réel
<i>Bektas et al. (2007)</i>	Regroupement	Sélection des arrêts (centroïdes)	Routage		Min. les coûts fixes et variables	Programmation linéaire (CPLEX)	Réel
<i>Euchi et al. (2012)</i>	Routage				Min. les coûts	Colonie de fourmis	Réel

2.3. Indicateurs de performance

Pour la résolution du SBRP, le coût du transport est l'un des indicateurs de performance les plus utilisés pour mesurer l'efficacité des méthodes de résolution. Par contre, la définition du coût prend plusieurs formes. Eldrandaly et al. (2010) et Schittekat et al. (2013) ont associé pour chaque segment possible entre deux arrêts, selon la distance, un coût qui dépend de la consommation du carburant. Park et al. (2011) ont visé la diminution des coûts par la diminution du nombre des autobus, en améliorant le taux d'occupation. Bektas et al. (2007) ont combiné les deux, c'est-à-dire qu'ils se sont intéressés aux coûts associés à la longueur de la route et ceux associés au nombre d'autobus. Demiral et al. (2008) ont incorporé le temps du voyage dans le coût total à minimiser.

D'autres indicateurs ont été étudiés par certains chercheurs au niveau du transport urbain, comme l'émission des polluants, l'encouragement du transport actif ou le taux de couverture. Par exemple, Shrestha et al. (2013) ont démontré qu'une élimination du nombre d'arrêts d'autobus peut améliorer la couverture de territoire, diminuer les émissions des GES et la diminution du temps de voyage. Chien et al. (2004) préconisent plutôt une optimisation des arrêts qui combine la réduction du nombre des arrêts et l'optimisation de leur emplacement. Saka et al. (2001) ont proposé un modèle pour déterminer les distances entre les arrêts pour une meilleure accessibilité.

Dans cette section, des indicateurs sur plusieurs plans qui ont un impact sur la performance du transport scolaire sont détaillés. En occurrence le plan économique avec l'indicateur de consommation du carburant, taux de dégradation des pneus et freins et le temps total du voyage. Le plan environnemental avec l'indicateur d'émissions des GES ou le plan de la santé des élèves avec l'indicateur du transport actif.

2.3.1. Indicateurs économiques

2.3.1.1. *Consommation du carburant*

En ce qui concerne la consommation de carburant, Mathew (2014) identifie deux modèles mathématiques pour estimer et prédire la consommation de carburant pour les vitesses moyennes comprises entre 10 et 56 km/h. Il propose la formule suivante :

$$T_c = K_1 + \frac{K_2}{V} \quad (1)$$

Où :

T_c : taux de consommation de carburant en (litres / km) ;

V : vitesse moyenne, où $10 \leq V \leq 56$ (km/h) ;

K_1 : paramètre associé au carburant consommé pour vaincre la résistance au roulement, approximativement proportionnelle au poids du véhicule (litres / km) ;

K_2 : paramètre approximativement proportionnelle à la consommation de carburant au ralenti (litres / h).

Dans le cadre d'un projet mené conjointement entre la Société de transport de Montréal (STM) et la société de transport de l'Outaouais (STO) en mars 2009 (Transport Canada, 2009) qui avait pour but de mesurer la réduction de la consommation de carburant. Ce projet est réalisé suite à la mise en service des autobus hybrides en remplaçant des autobus à propulsion diesel standard. Dans le rapport technique de ce projet publié par Transport Canada (2009), on retrouve les caractéristiques techniques de l'autobus témoin Nova LFS (tableau 2.9) qui possède une puissance motrice très proche de l'autobus scolaire, soit 220 chevaux-vapeur.

Tableau 2.9 Caractéristiques techniques de l'autobus analysé (Transport Canada, 2009)

Modèle	Puissance	Date de livraison	Cylindrée	Norme EPA	Transmission	Masse totale (kg)
Nova LFS	250 CV	janvier 2008	8.9	2007	ZF-Ecomat	12200

Les essais ont été réalisés sur un parcours normalisé, appelé Manhattan, sous la supervision d'un employé d'Environnement Canada. Les résultats ont été obtenus et analysés aux laboratoires d'Environnement Canada. Le graphique présenté à la figure 2.2, tiré du rapport technique de la technologie hybride (Transport Canada, 2009), montre la variation du taux de consommation du carburant en fonction de la vitesse de l'autobus NOVA LFS.

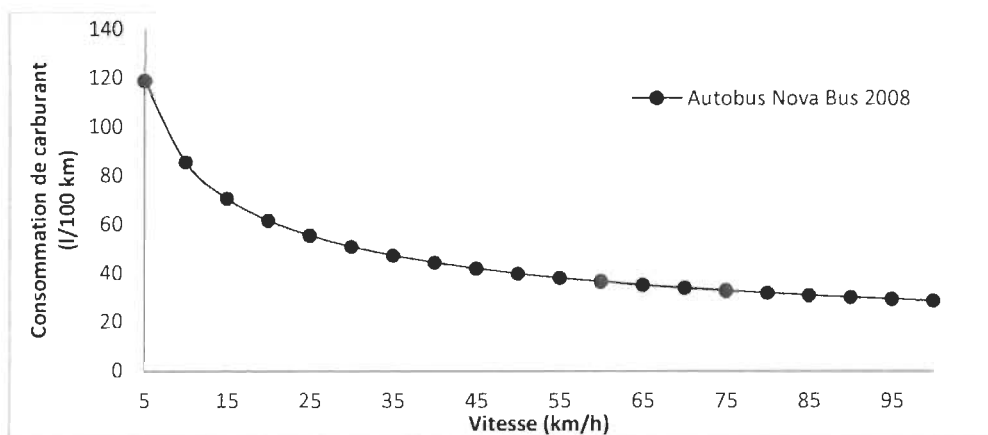


Figure 2.2 Variation du taux de la consommation du carburant en fonction de la vitesse (Transport Canada, 2009)

2.3.1.2. Usure des freins et des pneus

Lors du transport par autobus scolaire, deux composantes subissent une altération en lien avec le nombre des arrêts : les freins et les pneus. Au cours de l'étape du freinage, différentes charges sont appliquées sur le disque en même temps, soit la force centrifuge, la force thermoélastique et la force de friction. Le phénomène relié au freinage est la

création d'un grand flux de chaleur dans le disque pendant un très peu de temps. En raison de la différence de température élevée, le matériau est exposé à un choc thermique et des tensions élevées qui vont accélérer le phénomène du vieillissement et de la fatigue du disque de frein (Chevereau et al., 2002).

Il existe deux principaux types de freins utilisés dans les véhicules conventionnels (non électriques ou hybrides), soit les freins à disque et les freins à tambour (figures 2.3 et 2.4).

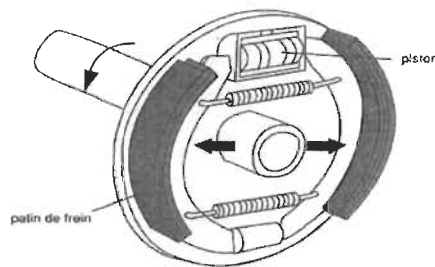


Figure 2.3 Schéma du frein à tambour

(Source :
<http://francasseinesaintdenis.joueb.com/news/guide-technique-les-freins>)

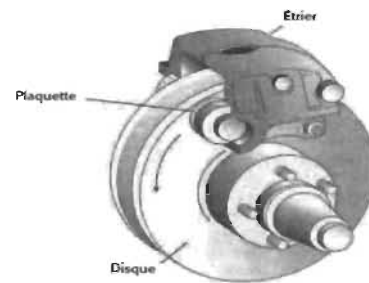


Figure 2.4 Schéma du frein à disque

(Source :
<http://www.campingcaravaningmag.ca/les-systemes-de-freins-expliques/systeme-de-freins-a-disque>)

Cao et al., (2003) présentent une étude théorique et expérimentale sur les freins. Dans un frein à tambour, les composantes sont logées dans un tour du tambour qui tourne avec la roue. À l'intérieur du tambour, ce sont les deux plaquettes qui pressent contre le tambour et ralentissent la roue. En revanche, les freins à disque utilisent un rotor extérieur et un étrier pour arrêter le mouvement de la roue. À l'intérieur de l'étrier de frein, ce sont des plaquettes de frein de chaque côté du rotor qui se serrent ensemble lorsque la pédale de frein est pressée. Les deux types de freins utilisent des procédés de friction pour résister à un déplacement du véhicule par inertie. Les résultats de l'action du freinage sont l'usure de ces plaquettes et patins et la libération consécutive d'une grande variété de matériaux dans l'environnement.

Les freins à disque sont très répandus dans les autobus scolaires. Leur usure dépend de plusieurs facteurs, comme la matière des freins, l'écoulement d'air à travers les rebords pour refroidir les freins et la géométrie des freins, des roues et des jantes. Le comportement de freinage du conducteur fait partie aussi de ces facteurs, mais demeure difficile à modéliser.

Oder et al. (2010) présentent une analyse thermique d'un système de freinage (figures 2.5, 2.6 et 2.7), montrant le comportement d'un frein actionné à deux reprises à l'instant 0 s et 284 s.

Selon la figure 2.6, suite à un premier freinage, la température des freins atteint 129 degrés Celsius, alors qu'au second freinage, la température atteint 161 degrés Celsius. D'après les mêmes chercheurs, cette différence est due au fait que la contrainte thermique est cumulative, c'est-à-dire que s'il n'y a eu pas assez de temps pour dissiper complètement la chaleur après un freinage, la chaleur au freinage suivant va atteindre un niveau encore plus élevé. Pour limiter la dégradation prématurée des freins, il est préférable d'augmenter le délai entre deux freinages pour permettre un refroidissement des freins.

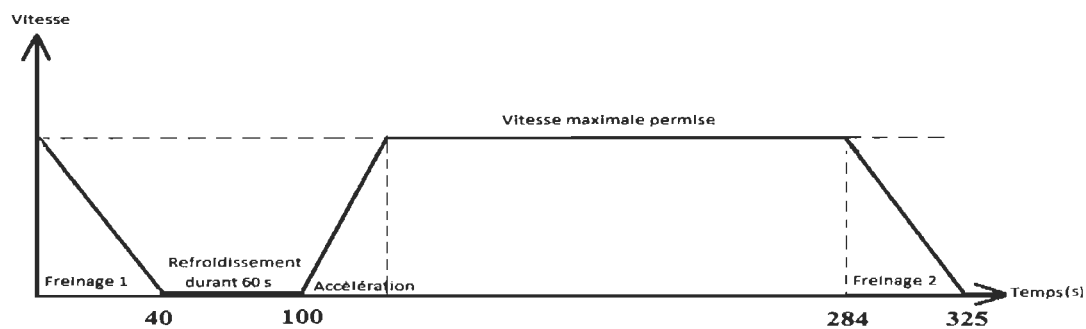


Figure 2.5 Variation de la vitesse en fonction du temps adapté de Oder et al. (2010)

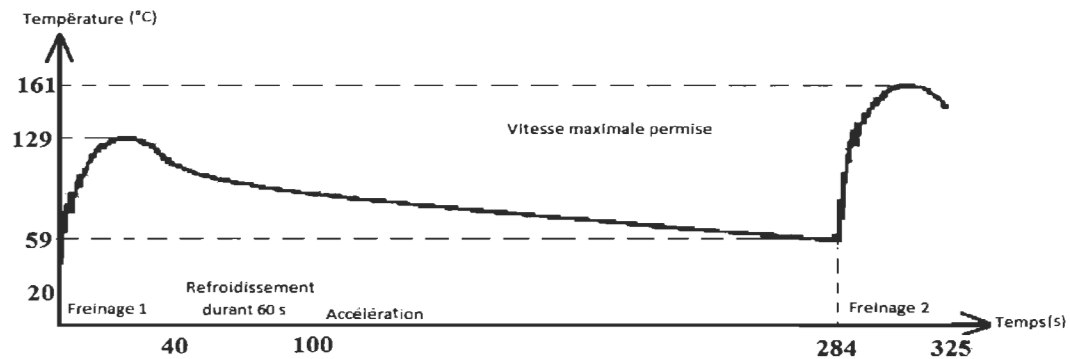


Figure 2.6 Variation de la température des freins pour le même cycle adapté de Oder et al. (2010)

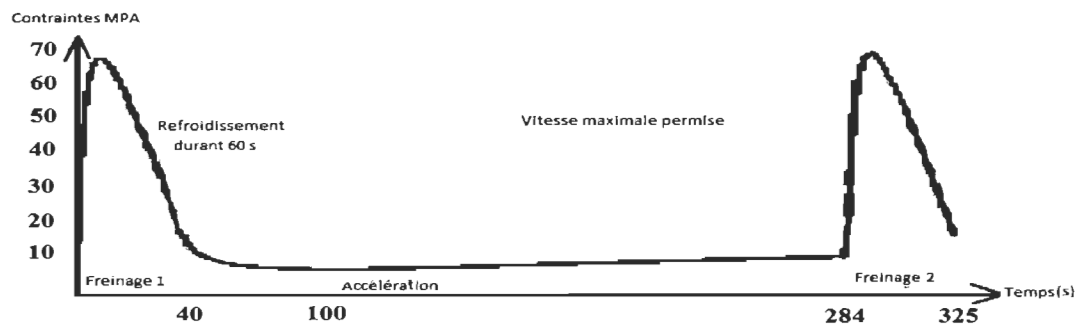


Figure 2.7 Variation des contraintes mécaniques des freins pour le même cycle adapté de Oder et al. (2010)

Selon l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRST, 2009), on peut distinguer deux types de causes d'usure d'un pneu : les causes maîtrisables, comme la pression du gonflage, la charge à emporter, la vitesse de conduite et les freinages et accélérations, et les causes non maîtrisables, comme le profil de la route, la température ambiante et le type de revêtement du pneu.

L'EPA (*US Environmental Protection Agency*) dans son application de simulation MOVE fourni des données sur la dégradation des pneus et freins (tableau 2.10) selon la PM-10 (les petites particules qui sont inférieures à 10 micromètres de diamètre) et la norme PM-2,5 (les petites particules qui sont inférieures à 2,5 micromètres de diamètre) (EPA, 2014).

Tableau 2.10 Les PM2.5 et PM10 moyennes pour les freins et pneus (EPA, 2014)

<i>Mode</i>	<i>Taux d'émission moyen (g/h)</i>
<i>Freinage</i>	3,12434
<i>Ralenti</i>	0,04999
<i>Vitesse entre 1 km/h et 25 km/h</i>	3,12434
<i>Vitesse entre 25 km/h et 50 km/h</i>	2,0027
<i>Vitesse supérieure à 50 km/h</i>	0,21246

2.3.1.3. Temps de voyage

Saka (2000) a décomposé le temps total de voyage en cinq temps, soit le temps total des périodes des accélérations et décélérations ($T_{a,d}$), le temps total des embarqu岸ements et débarqu岸ements (T_s), le temps total des arrêts causés par la signalisation routière (T_c), le temps total des périodes à la vitesse permise (T_o) et le temps total des périodes de pause et d'autres manœuvres qu'il n'a pas modélisées (T_m) (figure 2.8).

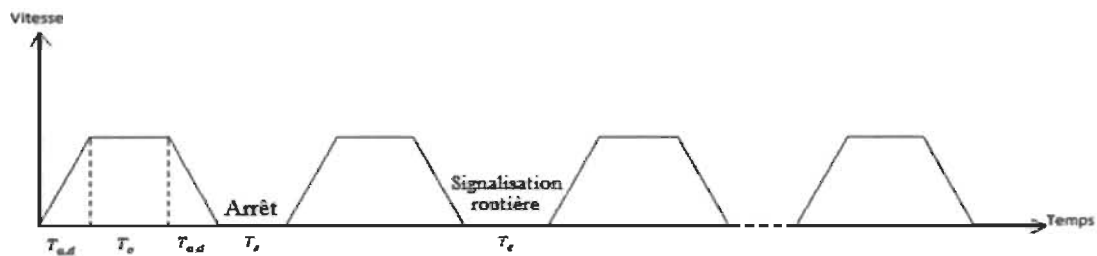


Figure 2.8 Schématisation d'un voyage d'autobus scolaire

Saka (2000) propose les formules suivantes pour calculer le temps total :

$$T_{Bus} = T_{a,d} + T_s + T_c + T_o + T_m \quad (1)$$

$$T_{a,d} = \frac{V * (a + d)}{2ad} \quad (2)$$

$$T_o = (D/V) - T_{a,d} \quad (3)$$

Où :

V : vitesse permise

a : accélération

d : décélération

D : distance totale

Par contre, Qin (2004) ne considère que deux composantes, soit le délai de la phase d'accélération et de décélération (T_1) et le temps de maintien (T_2) pendant l'arrêt pour les embarquements et les débarquements.

$$T_1 = \frac{V}{2a} + \frac{V}{2d}$$

$$T_2 = Q_s * w$$

Où :

V : vitesse permise ;

a : accélération ;

d : décélération ;

Q_s : Nombre total des élèves ;

w : Temps moyen d'embarquement et débarquement par élève.

Quant à Ziari (2007), il a décomposé le temps de voyage en quatre composantes, soit le temps de marche à pied nécessaire pour atteindre l'arrêt de chez soi, le temps de marche à pied pour atteindre la destination finale à partir du lieu de débarquement, le temps de maintien (sur place) pendant les arrêts d'embarquements et temps de maintien (sur place) pendant les arrêts de débarquements. Le temps de voyage en vitesse permise et le temps des accélérations et des décélérations sont connus. Son but était de minimiser le temps T en fonction de D.

$$T = 2 * \frac{X}{F} + \frac{L}{D} * S + \frac{L}{D} * B + \frac{L}{D} * \frac{(D - A)}{V}$$

où :

D : Distance moyenne entre les arrêts

X : Distance de marche = 0.25 D

F : Vitesse moyenne de marche

L : Distance totale

S : Temps de maintien

B : Temps de voyage en vitesse permise V

A : Distance nécessaire pour (A&D)

L'accélération

L'AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) propose une table (*Exhibit 10-70*) (voir le tableau 2.11) qui fournit les distances nécessaires pour atteindre des vitesses en fonction des vitesses de départ (AASHTO, 2001).

En 2003, le NCHRP (*National cooperative Highway Research Program*) a publié un rapport de recherche pour vérifier la véracité et l'adéquation des données de la table de *Exhibit 10-70* aux camions lourds. Il conclut que les paramètres de cette table correspondaient plus aux voitures que les camions, et qu'il faut que les paramètres de cette table soient révisés afin de mieux représenter les caractéristiques des camions, d'où la nécessité d'une nouvelle table (NCHRP, 2003), présentée au tableau 2.12.

Tableau 2.11 Distances (en mètres) nécessaire pour atteindre une vitesse cible à partir d'une vitesse initiale (AASHTO, 2001)

<i>Vitesse maximale de la route (km/h)</i>	<i>Vitesse cible (km/h)</i>	<i>Vitesse initiale (km/h)</i>							
		0	20	28	35	42	51	63	70
50	37	60	50	30					
60	45	95	80	65	45				
70	53	150	130	110	90	65			
80	60	200	180	165	145	115	65		
90	67	260	245	225	205	175	125	35	
100	74	345	325	305	285	255	205	110	40
110	81	430	410	390	370	340	290	200	125
120	88	545	530	515	490	460	410	325	245

Tableau 2.12 Distances (en mètres) nécessaire pour atteindre une vitesse cible à partir d'une vitesse initiale (NCHRP, 2003)

<i>Vitesse maximale de la route (km/h)</i>	<i>Vitesse cible (km/h)</i>	<i>Vitesse initiale en km/h</i>								
		0	23	29	35	42	48	58	64	71
48	37	84	49							
56	43	122	91	70						
64	50	180	145	122	94	52				
72	56	244	213	192	165	122	73			
80	63	335	311	290	259	219	171	61		
89	69	460	427	405	375	335	280	177	73	
97	76	610	579	558	530	488	436	326	232	101
105	80	759	725	695	680	637	585	475	372	244
113	85	933	902	884	853	814	765	652	552	384
121	89	1073	1045	1024	994	954	902	789	698	564

Detroit Diesel Corporation (DDC), un leader dans la fabrication des moteurs et des camions lourds, a développé une table appelée « *Spec Manager* » qui mesure les performances des camions lourds lors des accélérations dans différentes conditions (DDC, 2009). La table présentée au tableau 2.13 présente la synthèse de cette recherche.

Tableau 2.13 Distances (en mètres) nécessaire pour atteindre une vitesse cible à partir d'une vitesse initiale (DDC, 2009)

<i>Vitesse maximale de la route (km/h)</i>	<i>Vitesse cible (km/h)</i>	<i>Vitesse initiale en km/h</i>								
		0	23	29	35	42	48	58	64	71
48	37	38	26	16						
56	43	55	41	31	16					
64	50	94	81	71	55	39				
72	56	123	110	100	84	68	29			
80	63	198	185	175	159	143	104	56		
89	69	246	233	223	208	191	152	104	26	
97	76	308	295	285	269	253	214	166	87	33
105	80	396	383	373	358	342	302	254	176	122
113	85	495	482	472	456	440	401	352	274	220
121	89	546	533	523	508	492	483	404	326	272

La décélération

Maurya et al. (2016) suggèrent une modélisation de la manœuvre de freinage. Ils proposent de décomposer la décélération en deux régimes. Le premier régime correspond au comportement de la décélération après la vitesse critique et un deuxième régime avant cette vitesse où la décélération est maximale. La vitesse critique agit en tant que limite entre les deux régimes. Ainsi, on aura le régime I pour la vitesse supérieure à la vitesse critique et le régime II pour la vitesse inférieure ou égale à la vitesse critique.

Pour simuler le comportement de ces deux régimes, ils ont effectué une analyse de sensibilité pour trouver le modèle le plus proche entre les modèles linéaires, exponentiel ou polynomial (voir tableau 2.14).

Tableau 2.14 Résumé des modèles pour simuler la décélération (Maurya et al., 2016)

<i>Type de véhicule</i>	<i>Régime I</i>			<i>Régime II</i>		
	Linéaire	Exponentiel	Polynôme de second degré	Linéaire	Exponentiel	Polynôme de second degré
Poids lourd	0,066	0,031	0,038	0,006	0,1	0,036
Voiture	0,348	0,516	0,106	0,191	0,423	0,024
Trois roues motorisées	0,007	0,004	0,005	0,0000045	0,006	0,002
Deux-roues motorisé	0,021	0,016	0,09	0,017	0,028	0,19

Le tableau 2.14 donne les valeurs de la somme des carrés des résidus selon les trois modèles pour les deux régimes. Ainsi, on peut déduire que pour le régime I le modèle le plus adapté pour le poids lourd est le modèle exponentiel sous la forme :

$$d_1 = K_1 * e^{(-K_2 V)} \quad (1)$$

Et pour le régime II, le modèle le plus adapté est le modèle linéaire sous la forme :

$$d_2 = \alpha + \beta * V \quad (2)$$

Le tableau 2.15 montre les paramètres des modèles avec la vitesse critique.

Tableau 2.15 Paramètres des modèles avec la vitesse critique (Maurya et al., 2016)

<i>Type de véhicule</i>	<i>Régime I :</i> $d_1 = k_1 * e^{(-k_2 V)}$			<i>Régime II :</i> $d_2 = \alpha + \beta * V$			<i>Vitesse critique (m/s)</i>
	K1	K2	R2	α	β	R2	
<i>Poids lourd</i>	1,587	0,017	0,834	0,104	0,225	0,92	3,49
<i>Trois roues motorisées</i>	0,806	0,13	0,912	0,163	0,152	0,928	2,09
<i>Deux-roues motorisé</i>	1,106	0,08	0,994	0,342	0,087	0,86	11,46

2.3.2. Indicateurs relatifs à l'environnement et à la santé des enfants

2.3.2.1. *Émissions des gaz à effet de serre*

D'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014), 1950 est la première année où l'activité humaine a eu un impact direct plus important sur le climat que celui des radiations solaires. La tendance ne fut que confirmée, voire accentuée, jusqu'à l'année 2000 (figure 2.9).

Toujours selon la même source, la cause de ce déséquilibre est un rideau composé de gaz, soit les GES. La concentration accrue de ces gaz dans l'atmosphère absorbe une partie des radiations (rayonnement infrarouge) émises par la surface terrestre et laisse passer une partie, mais retourne une autre partie vers le sol terrestre, d'où le déséquilibre du bilan radiatif (GIEC, 2014).

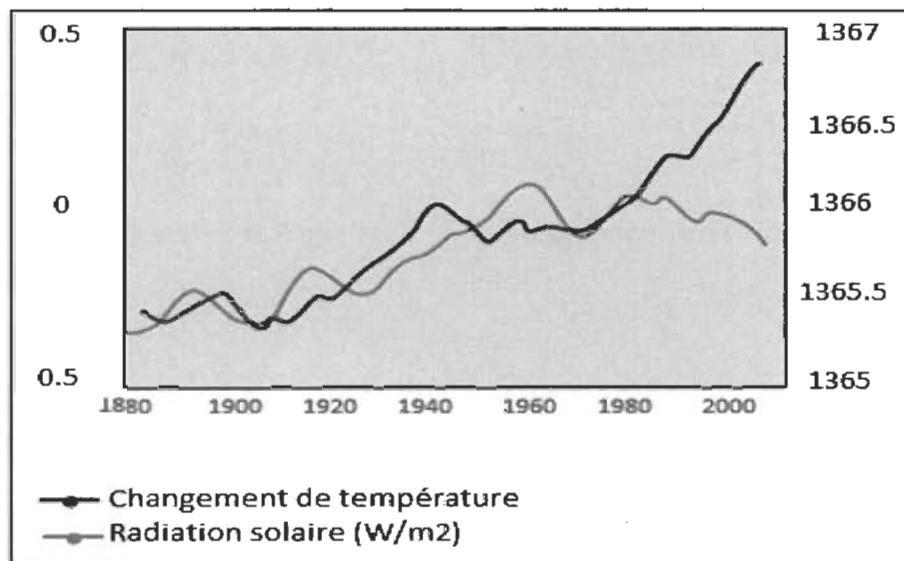


Figure 2.9 Changement de la température et radiation solaire selon les années adapté de (GIEC, 2014)

Selon Environnement et Changement climatique Canada, le transport routier est la seconde plus importante source de GES (figure 2.10), avec 170 Mégas tonnes, soit 23 % des GES (Environnement et Changement climatique Canada, 2016)

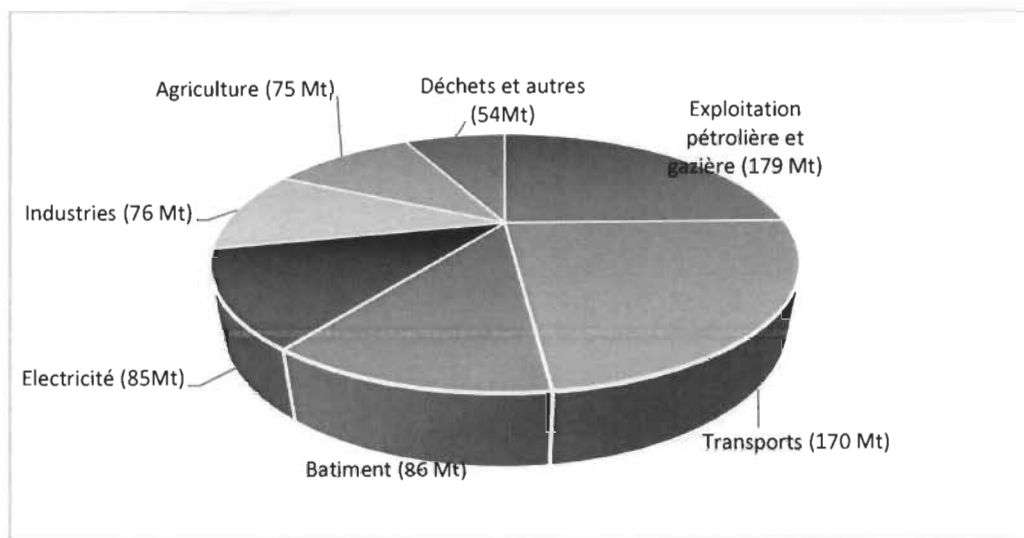


Figure 2.10 Diagrammes des sources des GES (Environnement et Changement climatique Canada, 2016)

La figure 2.11 montre l'évolution de ces émissions pour le Canada et pour les provinces et territoire (Statistique Canada, 2013). Il faut noter que la cible fixée dans le cadre de l'accord de Copenhague est de 17 % en dessous des niveaux d'émission de 2005, soit 621 Mégas tonnes.

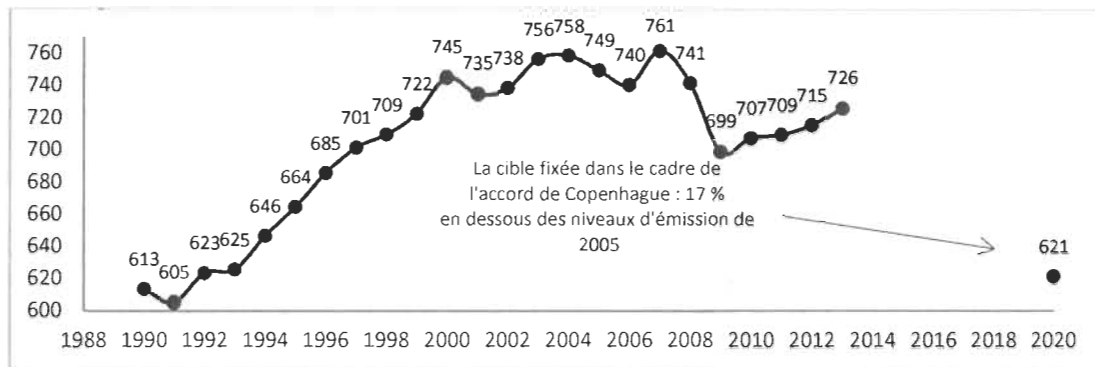


Figure 2.11 Émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de Canada de 1990 à 2013
(Statistique Canada, 2013)

Quoiqu'il n'y ait pas de statistiques sur l'apport du transport scolaire dans les émissions de GES, selon Transport Canada, pour l'année 2012, le transport terrestre représente environ 75 % de ces émissions, où le transport scolaire est inclus dans les véhicules lourds et légers (Transport Canada, 2012).

Selon EPA (2014), il y a deux sortes d'émissions issues du transport routier, soit les émissions de gaz d'échappement et les autres émissions. Les gaz d'échappement comprennent des matières relatives aux processus du moteur, telles que la combustion de carburant, l'huile brûlée et autre particule qui sortent du tuyau d'échappement. Les autres émissions incluent l'usure des freins, l'usure des pneus, etc.

Selon Zolnik (2013), les émissions du véhicule sont une fonction de quatre variables, soit les facteurs liés aux voyages, le comportement du conducteur, le réseau routier et les caractéristiques du véhicule. Boulter (2009) propose le modèle ARTEMIS, soit un outil d'estimation des émissions des GES émises par le transport routier et de suivi d'impact des politiques de transport. Il détermine le taux d'émission des GES à partir de la vitesse

moyenne du parcours. La figure 2.12 présente des taux d'émission des GES selon les saisons et les vitesses moyennes.

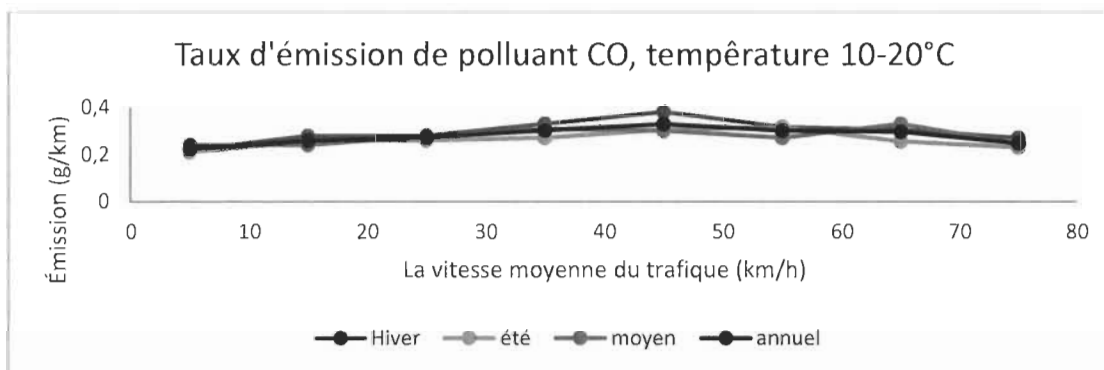


Figure 2.12 Exemple de calcul du taux des émissions de GES en fonction de la vitesse
(Boulter, 2009)

Il existe d'autres calculateurs d'émissions de GES accessibles au public. Par exemple, le FAQDD (Fonds d'Action Québécois pour le Développement Durable) propose un modèle qui estime les émissions de GES pour le transport, les matières résiduelles et les bâtiments. Pour le transport, le modèle utilise le taux de 2,33 kg de GES émis par litre d'essence sans plomb consommé et 2,68 kg de GES émis par litre de diesel (FAQDD, 2007).

De son côté, la *Environmental Protection Agency* (EPA, 2014) une agence indépendante rattachée au gouvernement américain, propose le logiciel MOBILE5 pour le calcul des émissions des GES, incluant le calcul de la consommation de carburant pour tous types de véhicules. Pour le calcul de ces données, il utilise des facteurs d'émission (kg / gallon) pour le CO₂, le N₂O et le CH₄. Ces facteurs d'émission sont multipliés par la quantité du carburant consommé et par le potentiel de réchauffement planétaire respectif (*Global Warming Potential*, GWP), le potentiel de réchauffement planétaire est un indice de comparaison associé à un gaz à effet de serre, quantifiant sa contribution au réchauffement global, comparativement à celle du CO₂ (Environnement et Changement climatique Canada, 2013). Lorsque cet indice est multiplié par la quantité émise, elle est convertie en

une quantité équivalente de CO₂, qui est appelée CO₂ équivalent ou CO₂é. La formule de calcul des émissions des GES proposée par la EPA est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2\text{eMétriqueTon} &= \text{Consommation}(L) * \\
 &\text{CO}_2\text{Facteur d'émission} \left(\frac{\text{kgCO}_2}{L} \right) * \frac{1 \text{ MetricTon}}{1000 \text{ Kg}} + \text{Consommation}(L) * \\
 &\text{N}_2\text{OFacteur d'émission} \left(\frac{\text{kgN}_2\text{O}}{L} \right) * \frac{1 \text{ MetricTon}}{1000 \text{ Kg}} * 310 + \text{Consommation}(L) * \\
 &\text{CH}_4\text{Facteur d'émission} \left(\frac{\text{kgCH}_4}{L} \right) * \frac{1 \text{ MetricTon}}{1000 \text{ Kg}} * 21
 \end{aligned}$$

Où :

- Facteur d'émission de CO₂ = 10. Kg CO / gallon = 2,65 Kg CO / L ;
- Facteur d'émission de N₂ O = 0,000199 kg / gallon = 0,0526 g /L ;
- Facteur d'émission de CH₄ = 0,18 Kg / gallon = 0,04762 Kg / L.

2.3.2.2. *Transport actif*

Selon l'agence de la santé publique du Canada (2014), le transport actif se définit comme toute forme de transport où l'énergie est fournie par l'être humain, par exemple la marche, la bicyclette, des patins à roues alignées, une planche à roulettes, etc. Le transport actif, selon la même source, peut améliorer la santé d'un individu grâce à l'effort physique fourni, augmente les contacts sociaux, et baisse le coût de la consommation de carburant et réduit les émissions de GES (Agence de la santé publique du Canada, 2014).

Fishman et al. (2015) démontrent que l'inactivité physique provoque entre 21 et 25% des causes de cancer, encore plus grandes pour le diabète (27%) et les maladies cardiaques ischémiques (30%). Selon les auteurs, la marche et le vélo représentent les méthodes les plus efficaces pour la réduction des émissions des CO₂. Selon toujours la même recherche, les Pays-Bas sont considérés comme un chef de file mondial dans le transport actif, avec 16% du réseau routier total consacré à des pistes cyclables et un tiers de tous les voyages de moins de 7,5 km sont faits par des vélos.

Gray et al. (2013) ont étudié les changements dans les habitudes de transport des jeunes Canadiens au cours de la dernière décennie, ce qu'ils appellent l'indicateur du transport actif (*active transport*, AT). Ils ont utilisé les données des études de la population, réalisées par l'Institut canadien de la recherche sur la condition physique et le mode de vie de pour les années 1992, 1998 et 2005, et l'Enquête Sociale Générale (ESG) de Statistique Canada de 2000 à 2010. D'après ces études, le pourcentage des jeunes qui voyagent en mode inactif (qui n'utilisent que des modes de transports motorisés pour aller à l'école) a passé de 51% à 62%. En revanche, le pourcentage de jeunes qui utilisent le mode actif a passé de 28% à 24%.

2.3.3. La synthèse de la revue des indicateurs

Le tableau 2.16 donne une synthèse des formules et modélisations qui sont utilisées pour calculer ou estimer les paramètres et les indicateurs de performance.

Tableau 2.16 Tableau récapitulatif des paramètres du calcul

Paramètre	Source	Estimation
<i>Distance d'accélération (0 à 50 km/h)</i>	Table NCHRP	180 m
<i>Le temps d'embarquement ou débarquement par élève</i>	(Shrestha et al., 2013)	5 s
<i>Le temps d'ouverture ou de fermeture des portes</i>	(Saka, 2001)	3 s
<i>Taux d'émission moyen pour les freins et pneus en freinage (g/h)</i>	(EPA, 2014)	3,12434
<i>Taux d'émission moyen pour les freins et pneus en accélération (g/h)</i>	(EPA, 2014)	2,56352
<i>Taux d'émission moyen pour les freins et pneus en vitesse 50 km/h et plus (g/h)</i>	(EPA, 2014)	0,21246
<i>L'émission du carbone équivalent en fonction de la consommation C(l)</i>	(EPA, 2014)	
<i>Facteur d'émission de CO₂</i>	(EPA, 2014)	2,65 Kg CO / L
<i>Facteur d'émission de N₂O</i>	(EPA, 2014)	0,0526 g /L ;
<i>Facteur d'émission de CH₄</i>	(EPA, 2014)	0,04762 Kg / L

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

La méthodologie de la recherche proposée vise à atteindre l'objectif principal de la recherche, soit de proposer une méthodologie de mesure de l'impact du regroupement des arrêts et de la variation de la distance limite maximale de marche et ce, sur les coûts, le temps de voyage, l'émission des GES et le transport actif. La figure 3.1 présente les étapes de la méthodologie proposée.

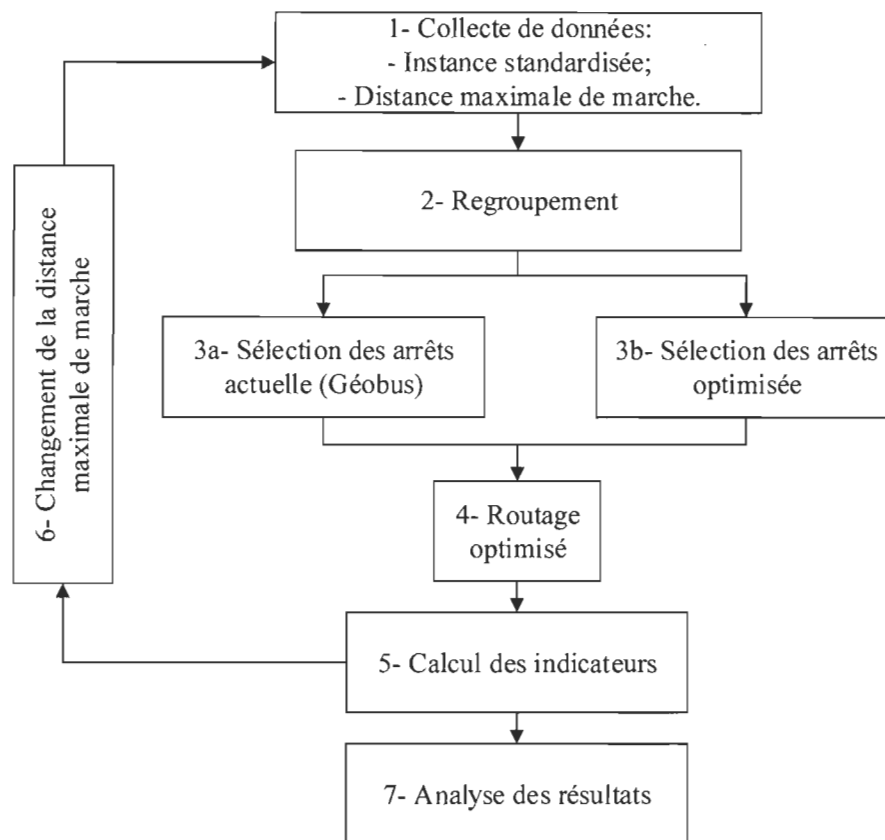


Figure 3.1 Méthodologie proposée

Dans ce chapitre, la méthodologie de mesure des impacts proposée sera expliquée à l'aide d'une instance exemple de petite taille (une seule école, 16 élèves et 10 arrêts disponibles).

Chaque étape y est détaillée, en comparant à chaque fois la méthode actuelle déployée dans les commissions scolaires et la méthode optimisée proposée.

Dans un premier temps, la collecte de données sur les adresses des écoles, résidences d'élèves et arrêts est réalisée (étape 1). De plus, la distance maximale de marche est définie, de même que la distance minimale pour pouvoir bénéficier du transport scolaire.

Dans un second temps, on commence le regroupement des arrêts (étape 2). Il est à noter que dans la méthode actuellement utilisée par les commissions scolaires, il n'y a pas de regroupement d'arrêts : les élèves sont assignées aux arrêts existants les plus près de leur adresse de résidence.

Cette étape de regroupement se fait selon la localisation géographique des adresses de résidence des élèves, de sorte à avoir des regroupements le plus denses possibles et qui visent à occuper la totalité de la capacité de l'autobus scolaire. Pour y parvenir, un algorithme de glouton modifié est utilisé. Cet algorithme réalise deux tâches principales qui s'exécutent de façon consécutive, en boucle, jusqu'à l'absence d'amélioration. La première tâche est le calcul des centroïdes des regroupements, alors que la deuxième est l'attribution des élèves au regroupement le plus proche.

Dans un troisième temps, la sélection des arrêts (étape 3) est réalisée distinctement selon la méthode actuelle et selon la méthode optimisée proposée. Une modélisation de la méthode actuelle est faite, qui vise à affecter à chaque élève l'arrêt le plus proche de son domicile. Pour la méthode optimisée proposée, un autre algorithme de sélection des arrêts a été développé, de type glouton. Cet algorithme consiste à choisir le minimum d'arrêts accessibles à tous les élèves.

Dans un quatrième temps, un algorithme de routage (étape 4) est proposé pour visiter les arrêts en minimisant la distance parcourue. Cette étape est réalisée actuellement par les commissions scolaires d'une façon manuelle, aidée par la fonction « séquençement des arrêts » disponible dans le logiciel Géobus. Par contre, le fonctionnement de cette fonction est occulte et les détails n'en sont connus de personne. Il a donc fallu, pour des raisons

pratiques de comparaison, de créer un équivalent de la méthode actuelle. Ainsi, l'algorithme de routage optimisé est appliqué autant dans la méthode actuelle que dans la méthode optimisée proposée. Le routage est fait en deux étapes. Une route initiale est créée par un algorithme de glouton modifié. Puis, une amélioration de cette route par la recherche tabou. Le choix de l'algorithme glouton modifié est dicté par le besoin d'une solution initiale dans les meilleurs délais. Quant au choix de la recherche tabou, il a été décidé pour les performances de cette métaheuristique dans l'amélioration des solutions.

Dans un cinquième temps et pour comparer la qualité des solutions de transport obtenues, une mesure de performance a été faite entre la méthode actuelle la méthode proposée (étape 5). Ainsi, pour une instance donnée, on calcule les indicateurs de performance suivant : les coûts, le nombre d'arrêts, le temps de voyage, le taux d'émission des GES et la distance marchée par les élèves.

Par la suite, des changements au niveau de la distance de marche maximale sont effectués (étape 6) pour en évaluer l'impact sur les différents indicateurs. Finalement, une analyse des résultats est proposée (étape 7).

Pour faciliter la génération des solutions de transport et le calcul des indicateurs de performance, un outil avec interface graphique a été réalisé en utilisant le langage de programmation VBA.

3.1. Collecte des données

La collecte des données consiste à réunir les adresses des élèves de l'organisation scolaire dans une base de données. Dans les commissions scolaires, Géobus communique avec des bases de données GPI et AVANT-GARDE qui gèrent les adresses des élèves inscrits et le service de garde. Les employés responsables de la gestion du transport scolaire doivent configurer Géobus en entrant ces données ainsi qu'une liste préétablie d'adresses d'arrêts de bus à visiter. Dans le cadre de ce mémoire, des instances artificielles ont été utilisées.

À des fins de présentation et d'explication de la méthodologie, on a créé une instance artificielle simple. Cette instance exemple comprend une seule école, 10 arrêts et 16

élèves. À l'exception de l'école, les arrêts et les adresses des élèves ont été générés aléatoirement, les coordonnées «x» et «y» variant dans un intervalle de 0 à 800. Pour cet exemple, la distance maximale de marche vers l'arrêt est fixée dans un premier temps à 180 mètres. Les coordonnées de cette instance exemple sont présentées dans le tableau 3.1 avec « El » pour élève, « Ar » pour arrêt et « Ec » pour école. La figure 3.2 présente une représentation géospatiale de l'instance.

Tableau 3.1 Coordonnées des adresses d'élèves, des arrêts et de l'école de l'instance exemple

	X	Y		X	Y		X	Y		X	Y
El 1	641	321	El 8	161	495	El 15	354	480	Ar 6	66	554
El 2	462	312	El 9	172	44	El 16	650	50	Ar 7	414	215
El 3	321	45	El 10	182	593	Ar 1	654	145	Ar 8	80	140
El 4	745	231	El 11	580	415	Ar 2	215	508	Ar 9	215	117
El 5	45	456	El 12	506	138	Ar 3	140	397	Ar 10	480	410
El 6	98	201	El 13	472	202	Ar 4	422	593	Ec	300	300
El 7	119	299	El 14	512	525	Ar 5	580	312			

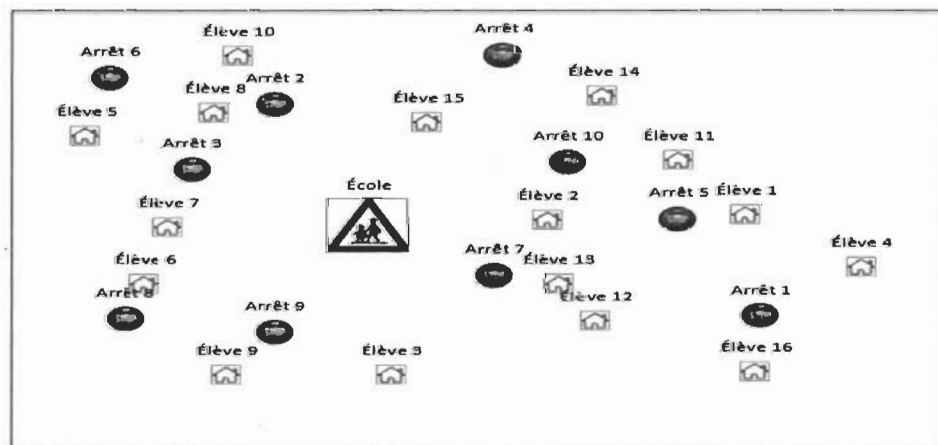


Figure 3.2 Représentation géospatiale de l'instance exemple

3.2. Regroupement

Actuellement, dans les commissions scolaires, la phase de regroupement des arrêts ne se fait pas. Elle est intégrée dans la phase de routage, lors de la création des routes, dans le but de gérer la capacité des autobus. Une fois les élèves assignés aux arrêts, chaque arrêt est ajouté à la route la plus proche, en visant à ne pas dépasser la capacité des autobus.

Dans le cas de la méthodologie proposée, la phase de regroupement est effectuée avec la sélection des arrêts et le routage, dans le but de prévenir tout dépassement de capacité ou les faibles taux d'occupation des autobus lors de la phase de routage. Pour y parvenir, un algorithme utilisant le principe du regroupement euclidien et un algorithme du glouton sont proposés.

D'abord, un regroupement initial d'élèves est fait en divisant le nombre d'élèves par la capacité des autobus. Ceci formera un ou plusieurs regroupements d'élèves. Ensuite, les élèves sont distribués aux différents regroupements selon la distance entre leur résidence et le centroïde de chaque regroupement. Un centroïde de regroupement est un point imaginaire qui a comme abscisse et ordonnée la moyenne des abscisses et ordonnées des adresses des élèves composant ce regroupement. Puis, une phase d'équilibrage est effectuée pour égaliser la taille des regroupements, en retirant des élèves des regroupements avec une taille dépassant la capacité des autobus. On les redistribue alors vers le regroupement le plus proche, dont la taille est inférieure à la capacité des autobus. La figure 3.3 présente la suite des étapes de l'algorithme de regroupement proposé.

Les prochains paragraphes présentent les différentes étapes et itérations de l'algorithme de regroupement proposé, appliqué à l'instance exemple issue de la phase de collecte de données.

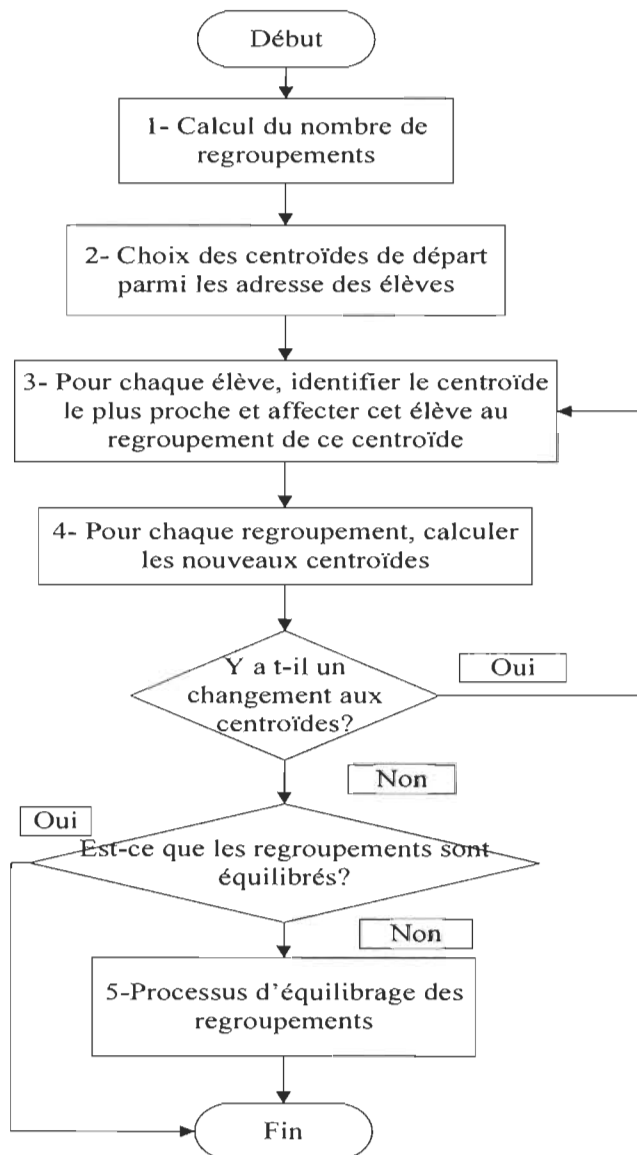


Figure 3.3 Étapes de l'algorithme de regroupement

➤ Étape 1 : Calcul du nombre de regroupements

Le programme commence par le calcul du nombre de regroupements. Il prend le nombre total des élèves et le divise par la capacité d'un autobus. Pour cet exemple, la capacité de

l'autobus est 8 et le nombre total des élèves est 16. Alors, il y aura deux regroupements constitués, avec une taille de 8 élèves chacun.

➤ Étape 2 : Choix des centroïdes de départ

Comme point de départ, on choisit deux centroïdes de façon aléatoire parmi les adresses des élèves. Ici, on a choisi l'adresse de l'élève 5 comme centroïde au regroupement A et l'adresse de l'élève 3 comme centroïde au regroupement B.

➤ Étape 3 : Constitution des regroupements

La constitution des regroupements se fait en deux étapes. À la première étape, on calcule les distances entre chaque élève et chaque centroïde. Puis, à la deuxième étape, on affecte chaque élève au centroïde le plus proche. La figure 3.4 montre le résultat de cette étape pour l'instance exemple.

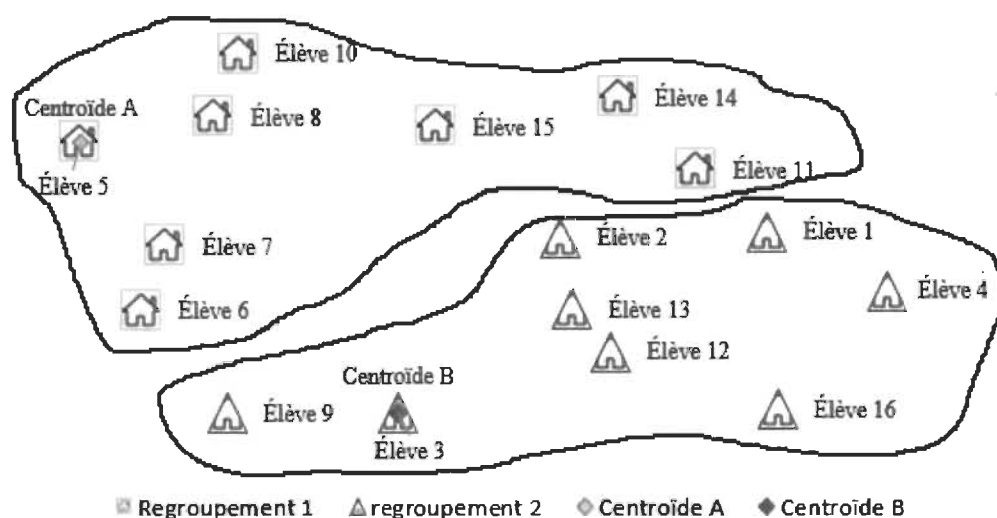


Figure 3.4 Regroupement par rapport aux centroïdes de départ pour l'instance exemple

➤ Étape 4 : Calcul des centroïdes par regroupement

À cette étape, on calcule les nouveaux centroïdes pour chaque regroupement. Il s'agit de calculer les moyennes des coordonnées des points de ce regroupement en x et en y, ce qui

donne le centroïde réel. La figure 3.5 montre les deux regroupements avec leurs nouveaux centroïdes pour l'instance exemple.

Une fois les nouveaux centroïdes calculés, on vérifie si les nouveaux centroïdes sont identiques aux anciens dans le but de vérifier si des changements ont été apportés à la composition des regroupements. Dans le cas où on trouve qu'il y ait du changement, on revient à l'étape 3. Sinon, on passe à l'étape 5.

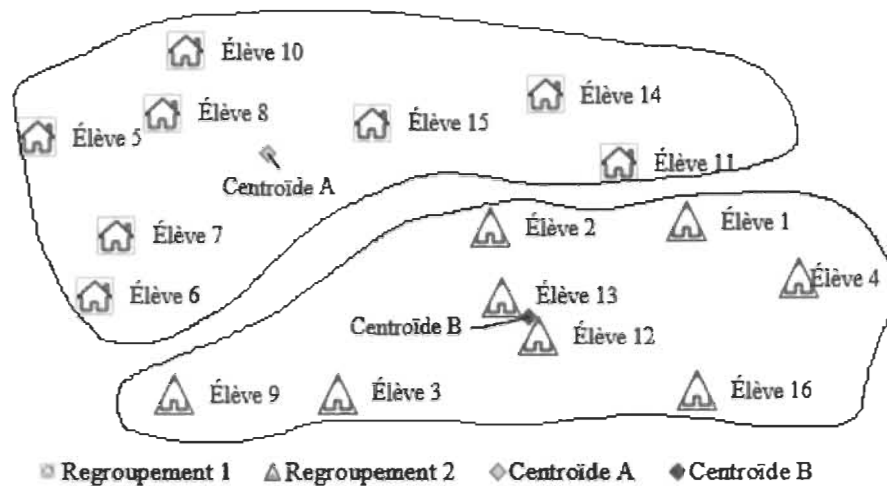


Figure 3.5 Regroupement avec les nouveaux centroïdes pour l'instance exemple

➤ Étape 5 : Équilibrage des regroupements

Il s'agit d'un processus qui vérifie si les regroupements ont le même nombre d'élèves. Il est composé de quatre étapes. D'abord, on identifie le regroupement qui dépasse le plus la capacité. Puis, on vérifie, pour chaque élève de ce regroupement, celui qui est le plus proche d'un autre regroupement qui a moins d'élèves. Ensuite, on transfère cet élève vers le nouveau regroupement. Enfin, on recalcule les centroïdes et on recommence depuis la première étape, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de regroupement qui dépasse la capacité. La figure 3.6 montre les étapes du processus d'équilibrage des regroupements, alors que la figure 3.7 présente les deux regroupements finaux de huit élèves pour l'instance exemple.

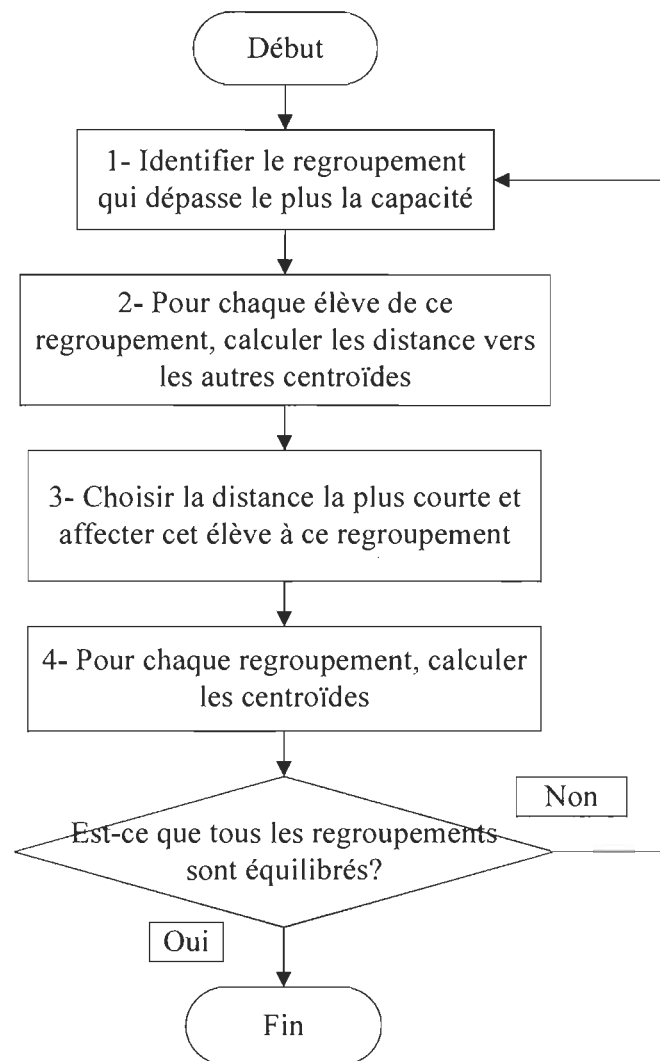


Figure 3.6 Processus d'équilibrage des regroupements

Pour assurer une facilité de l'utilisation accrue, un programme en VBA a été conçu pour intégrer les étapes de cet algorithme de regroupement.

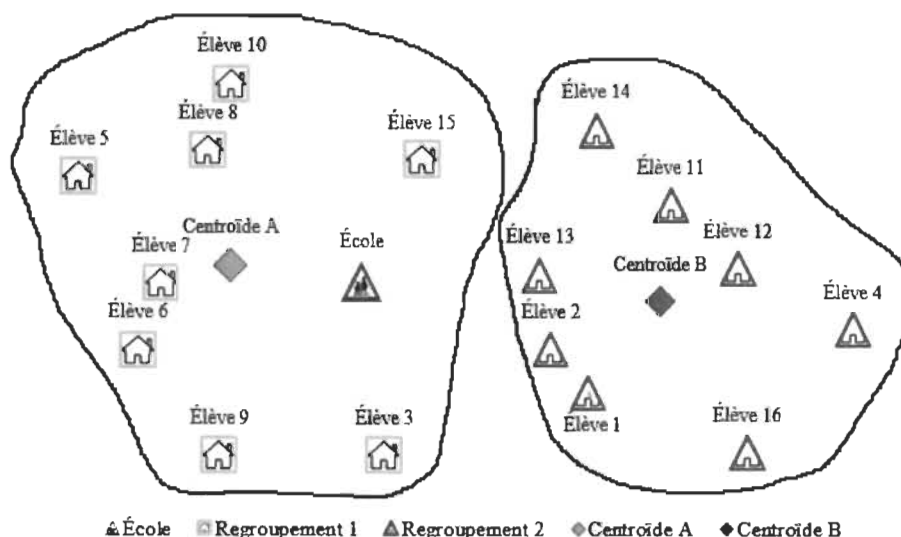


Figure 3.7 Répartition des élèves en regroupements pour l'instance exemple

3.3. Sélection des arrêts

Pour ce qui est de la méthode actuellement utilisée par les commissions scolaires, la sélection des arrêts pour chaque élève se fait par le choix de l'arrêt le plus proche de l'adresse de résidence de l'élève, qui ne doit pas dépasser la distance maximale de marche. Chaque commission scolaire possède une liste d'arrêts qui ont été choisis préalablement et qui sont réutilisés chaque année. Cette liste est remise à jour rarement, seulement lors de l'apparition de nouveaux développements domiciliaires ou lorsqu'un élève ne peut être assigné à aucun arrêt en raison du dépassement de la distance maximale de marche.

Dans les sous-sections suivantes, la méthode actuelle et la méthode optimisée proposée de la sélection des arrêts sont détaillées et appliquées à l'instance exemple.

3.3.1. Méthode actuelle de sélection des arrêts

La méthode actuelle de sélection des arrêts utilisée dans le logiciel Géobus consiste à attribuer à chaque élève l'arrêt le plus proche de son domicile sans dépasser la distance maximale de marche. La figure 3.8 présente le résumé des étapes du processus pour représenter le fonctionnement de ce logiciel. Dans le but de modéliser cette méthode

actuelle, une approche de calcul à l'aide de matrices est utilisée. À la première étape, une matrice des distances Élèves – Arrêts est créée. À la deuxième étape, on détermine la distance minimale de chaque élève vers un arrêt. À la troisième étape, sans dépasser la limite maximale de marche, on sélectionne l'arrêt le plus proche à l'élève. Si aucun arrêt ne le permet, un arrêt à son domicile est créé.

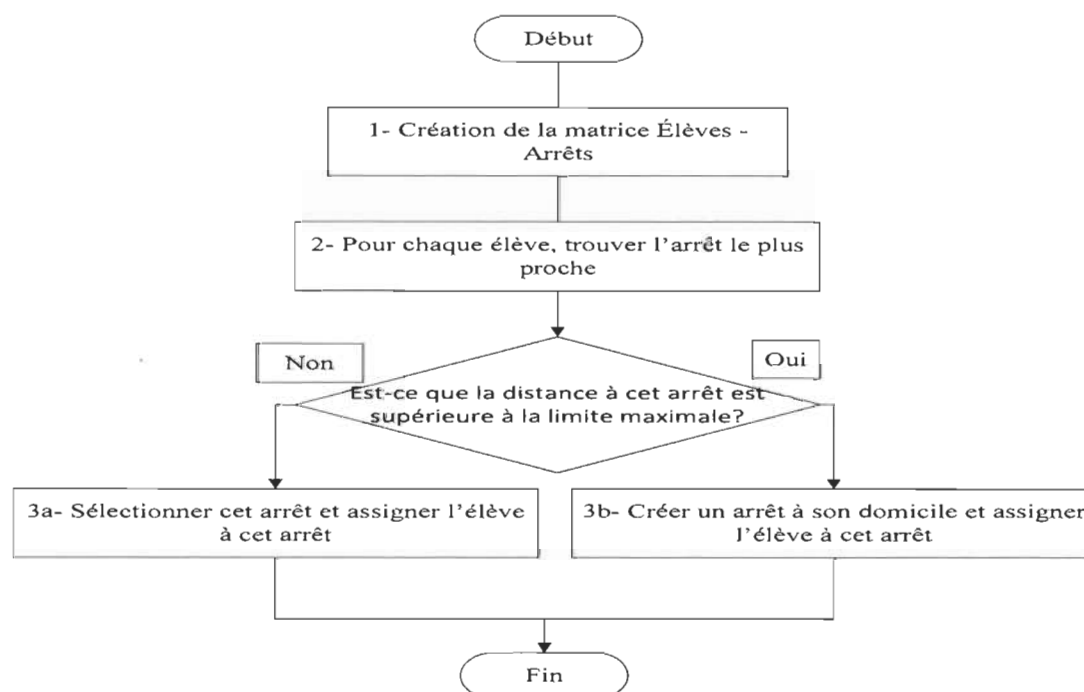


Figure 3.8 Étapes de la méthode actuelle de sélection des arrêts

Le tableau 3.2 présente la matrice des distances entre les domiciles des élèves et les arrêts issue de l'instance exemple. La dernière colonne montre la distance minimale à marcher. Dans cet exemple, la distance maximale de marche a été fixée à 180 mètres.

Suite à cette sélection, une table d'assignation est créée (tableau 3.3). Cette table présente la liste des élèves assignés à chaque arrêt. Dans ce cas, on remarque que tous les arrêts ont été retenus.

Tableau 3.2 Matrice de sélection des arrêts de la méthode actuelle

		Arrêts										Distance minimale (m)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Élèves	1	176	465	507	349	62	620	251	589	472	184	62
	2	254	315	333	284	118	464	108	419	315	100	100
	3	348	475	396	557	372	569	194	259	128	398	128
	4	125	598	627	485	184	752	331	671	542	320	125
	5	684	178	112	401	554	100	441	318	379	437	100
	6	559	329	200	509	495	354	316	64	144	435	64
	7	557	230	100	422	461	260	307	164	206	378	100
	8	605	56	100	279	457	112	377	364	382	330	56
	9	492	466	354	603	488	521	296	133	85	478	85
	10	651	91	200	240	487	122	444	464	477	350	91
	11	280	377	440	238	103	532	260	571	471	100	100
	12	148	471	448	463	189	606	120	426	292	273	120
	13	191	400	385	394	154	537	59	397	271	208	59
	14	406	297	393	113	224	447	325	579	505	119	113
	15	450	142	230	132	282	297	272	437	389	144	132
	16	95	632	617	589	271	771	288	577	440	398	95

Tableau 3.3 Table d'assignation des arrêts selon la méthode actuelle

	Arrêts									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Élève 4	Élève 10	Élève 7	Élève 15	Élève1	Élève5	Élève 13	Élève 6	Élève 9	Élève 11
Élèves	Élève 16	Élève 8		Élève 14			Élève 12		Élève 3	Élève 2

3.3.2. La méthode optimisée de sélection des arrêts

Le problème d'assignation d'élèves à des arrêts d'autobus est un problème classique de recouvrement d'ensemble (*set covering problem*). Ce type de problème est NP-difficile (Lan et al., 2005), d'où la nécessité d'utiliser des algorithmes de type heuristique ou méta-heuristique pour le résoudre. Un problème de recouvrement d'ensemble consiste à choisir le minimum d'arrêts, tout en respectant les contraintes d'accessibilité.

La méthode proposée ici consiste, dans un premier temps, à inclure dans l'ensemble des arrêts d'autobus la liste des adresses des élèves et celle de l'école. À partir de cette matrice de distance Élèves-Arrêts modifiée (tableau 3.4), une matrice d'accessibilité est créée. Ensuite, un algorithme proposé résout le problème de recouvrement. La figure 3.9 présente les étapes de l'algorithme optimisé de sélection des arrêts.

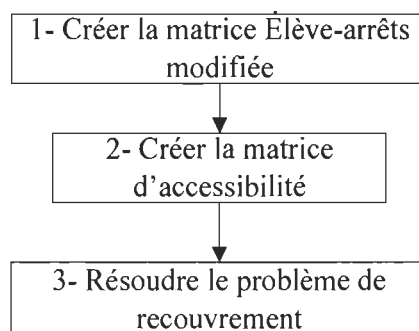


Figure 3.9 Étapes de l'algorithme de sélection des arrêts

3.3.2.1. *La matrice Élèves – Arrêts modifiée*

L'algorithme optimisé de sélection des arrêts proposé débute, comme la méthode actuelle, par la création d'une matrice Élèves-Arrêts, mais en ajoutant les adresses des domiciles des élèves et de l'école dans la liste des arrêts. L'ajout de l'école permet d'assigner directement certains élèves directement à l'école, en évitant de les assigner à un autre arrêt : ils n'ont pas accès au service du transport scolaire. Le tableau 3.4 présente la matrice Élèves – Arrêts modifiée pour l'instance exemple.

Tableau 3.4 Matrice Élèves – Arrêts modifiée

		Élèves															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Arrêts	École	342	162	256	450	299	225	181	239	286	316	303	262	198	309	188	430
	1	176	254	348	125	684	559	557	605	492	651	280	148	191	406	450	95
	2	465	315	475	598	178	329	230	56	466	91	377	471	400	297	142	632
	3	507	333	396	627	112	200	100	100	354	200	440	448	385	393	230	617
	4	349	284	557	485	401	509	422	279	603	240	238	463	394	113	132	589
	5	62	118	372	184	554	495	461	457	488	487	103	189	154	224	282	271
	6	620	464	569	752	100	354	260	112	521	122	532	606	537	447	297	771
	7	251	108	194	331	441	316	307	377	296	444	260	120	59	325	272	288
	8	589	419	259	671	318	64	164	364	133	464	571	426	397	579	437	577
	9	472	315	128	542	379	144	206	382	85	477	471	292	271	505	389	440
	10	184	100	398	320	437	435	378	330	478	350	100	273	208	119	144	398
Élèves	1	0	179	423	138	611	556	522	511	545	534	112	227	207	241	328	271
	2	179	0	302	294	441	381	343	352	395	397	157	179	110	219	200	322
	3	423	302	0	463	495	272	325	478	149	565	452	207	218	517	436	329
	4	138	294	463	0	735	648	630	641	603	669	247	256	275	375	464	204
	5	611	441	495	735	0	260	174	122	431	194	537	560	497	472	310	729
	6	556	381	272	648	260	0	100	301	174	401	527	413	374	526	379	572
	7	522	343	325	630	174	100	0	200	260	301	475	419	366	453	297	586
	8	511	352	478	641	122	301	200	0	451	100	427	496	427	352	194	661
	9	545	395	149	603	431	174	260	451	0	549	551	347	339	589	472	478
	10	534	397	565	669	194	401	301	100	549	0	436	559	487	337	206	717
	11	112	157	452	247	537	527	475	427	551	436	0	287	239	129	235	372
	12	227	179	207	256	560	413	419	496	347	559	287	0	72	387	374	169
	13	207	110	218	275	497	374	366	427	339	487	239	72	0	325	302	234
	14	241	219	517	375	472	526	453	352	589	337	129	387	325	0	164	495
	15	328	200	436	464	310	379	297	194	472	206	235	374	302	164	0	522
	16	271	322	329	204	729	572	586	661	478	717	372	169	234	495	522	0

3.3.2.2. Matrice d'accessibilité

Une fois la matrice Élèves - Arrêts modifiée est complétée, une matrice d'accessibilité est créée. Elle indique l'existence ou non d'une assignation possible entre un élève et un arrêt, en inscrivant « 1 » lorsqu'une assignation est possible, soit la distance entre ces deux points est inférieure à la distance maximale de marche, et « 0 » lorsque l'assignation est impossible (la distance est supérieure à la distance maximale de marche). Le tableau 3.5 présente la matrice d'accessibilité pour l'instance exemple.

3.3.2.3. Résolution du problème de recouvrement

La figure 3.10 présente les étapes de l'algorithme proposé pour résoudre le problème de l'ensemble de recouvrement. À partir de la matrice d'accessibilité modifiée, il s'agit de vérifier s'il y a des élèves qui peuvent être assignés à l'arrêt de l'école. Pour cet exemple, l'élève 2 est retiré de la matrice, car il est considéré très proche de l'école et, par conséquent, il ne figurera pas dans la table des assignations.

Tableau 3.5 Matrice d'accessibilité

		Élèves															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Arrêts	École	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
	3	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	6	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
Élèves	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
	12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
	13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Ensuite, on calcule la somme des « 1 » par colonne. On identifie par la suite la colonne avec le plus grand nombre de « 1 ». Ici, elle correspond à deux arrêts 1 et 2, on choisit l'arrêt 2 (tableau 3.6). On retire la colonne correspondant à l'arrêt 2, ainsi que les lignes qui correspondent aux élèves couverts par cet arrêt, soit les élèves, 5, 8, 10 et 15 (tableau 3.7). On répète les étapes précédentes jusqu'il n'y ait plus d'élève à assigner. Les tableaux 3.8, 3.9 et 3.10 montrent les différentes transformations de la matrice d'accessibilité pour l'instance exemple.

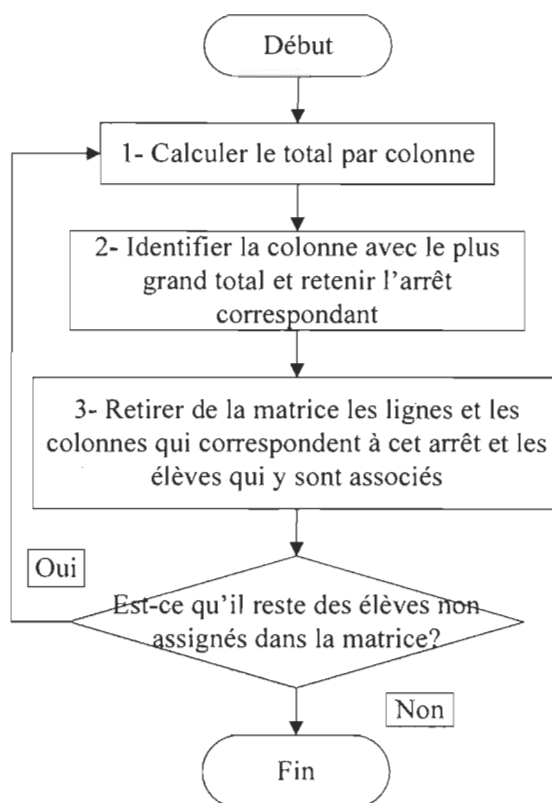


Figure 3.10 Algorithme de sélection de résolution du problème de recouvrement

Tableau 3.6 Première transformation de la matrice d'accessibilité

	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Ar5	Ar6	Ar7	Ar8	Ar9	Ar10	Év1	Év3	Év4	Év5	Év6	Év7	Év8	Év9	Év10	Év11	Év12	Év13	Év14	Év15	Év16
Év1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Év3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Év4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Év5	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Év6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Év7	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Év8	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Év9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Év10	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Év11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Év12	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
Év13	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Év14	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
Év15	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Év16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	4	4	3	2	3	3	2	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	2	3	2	2	2

Tableau 3.7 Deuxième transformation de la matrice d'accessibilité

	Ar1	Ar3	Ar4	Ar5	Ar6	Ar7	Ar8	Ar9	Ar10	Év1	Év3	Év4	Év6	Év7	Év9	Év11	Év12	Év13	Év14	Év16
Év1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Év3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Év4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Év6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Év7	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Év9	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Év11	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Év12	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
Év13	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Év14	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Év16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	4	1	1	3	0	2	3	3	2	3	2	2	3	2	3	3	3	2	2	2

Tableau 3.8 Troisième transformation de la matrice d'accessibilité

	Ar1	Ar3	Ar4	Ar5	Ar6	Ar7	Ar8	Ar9	Ar10	Év3	Év6	Év7	Év9	Év11	Év13	Év14
Év3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
Év6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
Év7	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Év9	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0
Év11	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
Év13	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Év14	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
	0	1	1	2	0	1	3	3	2	2	3	2	3	2	1	2

Tableau 3.9 Quatrième transformation de la matrice d'accessibilité

	Ar1	Ar3	Ar4	Ar5	Ar6	Ar7	Ar9	Ar10	Év3	Év11	Év13	Év14
Év3	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Év11	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
Év13	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
Év14	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
	0	0	1	2	0	1	1	2	1	2	1	2

Tableau 3.10 Cinquième transformation de la matrice d'accessibilité

	Ar1	Ar3	Ar4	Ar6	Ar7	Ar9	Ar10	Év3	Év14
Év3	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Év14	0	0	1	0	0	0	1	0	1
	0	0	1	0	0	1	1	1	1

Le tableau 3.11 présente la table d'assignation pour l'instance exemple. On remarque que seulement six arrêts ont été retenus, plutôt que 10 avec la méthode actuelle.

Tableau 3.11 Table d'assignation selon l'algorithme optimisé de sélection des arrêts

	Arrêts					
	1	2	4	5	8	9
Élèves	Élève 1	Élève 5	Élève 14	Élève 13	Élève 6	Élève 3
	Élève 4	Élève 8		Élève 11	Élève 7	
	Élève 12	Élève 10			Élève 9	
	Élève 16	Élève 15				

3.3.3. Comparaison entre les deux méthodes de sélection

Les figures 3.11 et 3.12 présentent les résultats de la sélection des arrêts selon les deux méthodes, soit la méthode actuelle et la méthode modifiée. Les triangles représentent les positions des arrêts et les carrés représentent les résidences des élèves. Pour cet exemple, la méthode actuelle a retenu les 10 arrêts, alors que la méthode optimisée a donné une solution avec 6 arrêts, soit une réduction de 40% pour cette instance exemple.

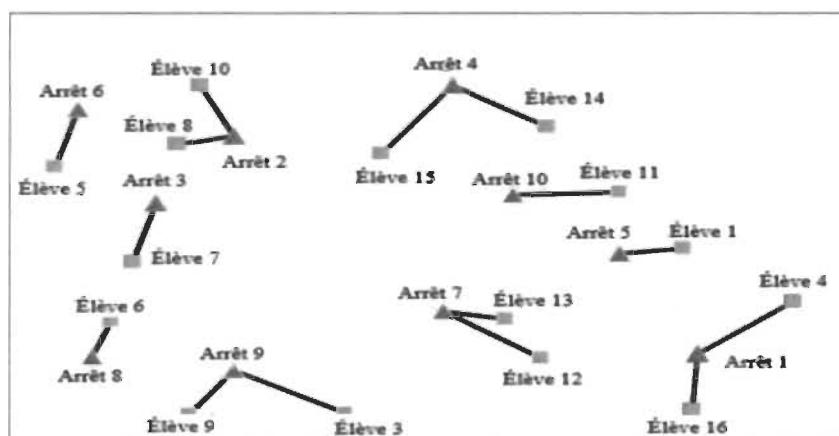


Figure 3.11 Solution d'assignation des élèves selon la méthode de sélection des arrêts actuelle

3.4. Routage

Pour la génération des routes effectuée actuellement, le gestionnaire du transport scolaire de chaque commission scolaire ajoute chaque élève assigné à l'arrêt le plus proche à la route qui mène vers son école. Dans le cas où cet ajout provoque un dépassement de la capacité de l'autobus, le gestionnaire crée une autre route pour équilibrer les capacités. Géobus n'a pas de fonction de routage, mais propose une fonction appelée « séquençement des arrêts », permettant de proposer un ordre de visite optimisé.

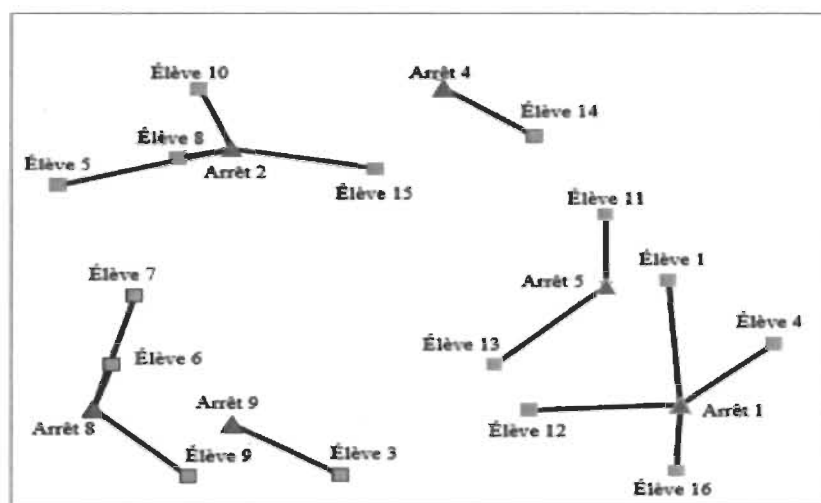


Figure 3.12 Solution d'assignation des élèves selon l'algorithme de sélection des arrêts optimisé proposé

Puisque le fonctionnement de cette fonction n'est pas connu et inaccessible, il a fallu, pour des raisons de mesure de performance, créer un algorithme réalisant d'une façon automatisée l'étape de routage. La figure 3.13 montre les étapes proposées pour l'algorithme de routage.

À la première étape, on prend le premier regroupement issu de la phase de regroupement. À la deuxième étape, à partir des arrêts retenus lors de la phase de sélection des arrêts, une

route initiale est créée en utilisant l'algorithme de glouton modifié proposé. Par la suite, à la troisième étape, la route initiale est améliorée en utilisant un algorithme tabou proposé. Les trois étapes se répètent pour tous les regroupements.

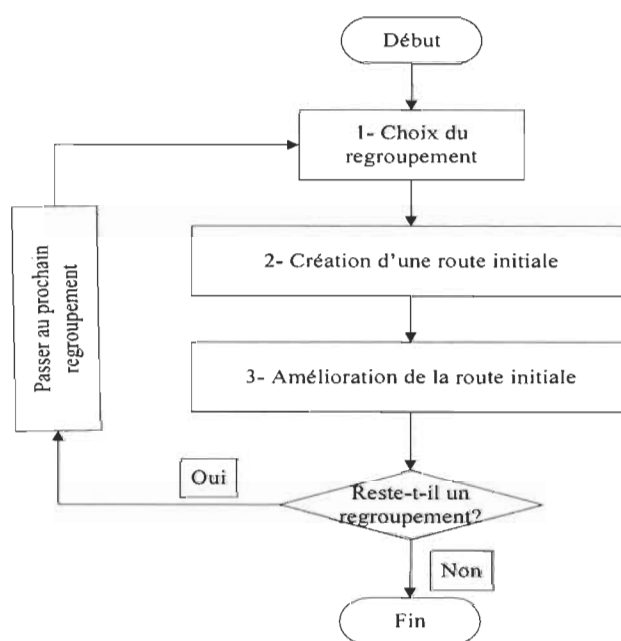


Figure 3.13 Étapes de l'algorithme de routage proposé

Les prochaines sections montrent un exemple de l'utilisation de l'algorithme de routage proposé, à partir de la solution d'assignation obtenue par la méthode actuelle de sélection des arrêts (tableau 3.3). L'annexe 2 présente les résultats de l'utilisation de l'algorithme de routage pour la solution d'assignation par l'algorithme de sélection des arrêts optimisée (tableau 3.11).

3.4.1. Création d'une route initiale

Pour l'instance exemple, on a considéré un seul regroupement contenant les 16 élèves. Un algorithme de type glouton est proposé pour la création de la route initiale. Cette route initiale est nécessaire dans une étape ultérieure, lorsque l'algorithme tabou sera expliqué.

La création de la route initiale, comme montrée à la figure 3.14, consiste dans un premier temps à créer une « matrice de distances DE – À » avec les arrêts retenus suite à la phase de sélection des arrêts. Puis, une autre matrice appelée « matrice de rang » qui propose une autre dimension de mesure autre que les distances, basée sur le classement des coordonnées de l'arrêt par rapport aux coordonnées des autres arrêts. À partir de ces deux matrices, on crée une troisième matrice appelée « matrice des produits » en multipliant les composants du même ordre des deux matrices. La dernière étape est la création du trajet. En considérant l'école comme point de départ et comme point d'arrivée, on visite les arrêts selon l'ordre croissant de la valeur dans la matrice des produits.

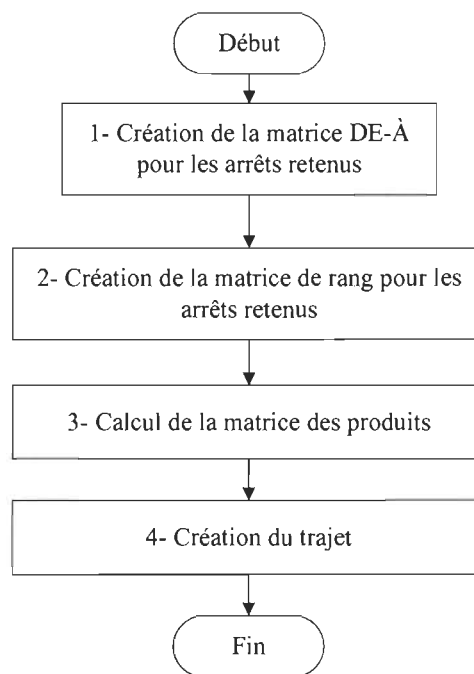


Figure 3.14 Étapes de la création de la route initiale

3.4.1.1. Création de la matrice DE-À

La première étape consiste à créer une matrice De – À des arrêts retenus. Le tableau 3.12 présente un exemple pour l'instance exemple par la méthode de sélection actuelle. Cette matrice contient les distances entre chaque paire d'arrêts retenus. Les coordonnées x et y

des arrêts ont été ajoutés dans deux colonnes à la gauche de la matrice. Ici, le calcul des distances est fait d'une façon euclidienne (à vol d'oiseau).

Tableau 3.12 La matrice De - À pour les arrêts retenus

		Arrêts												
		X	Y	École	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arrêts	École	300	300	-	386	225	187	317	280	345	142	272	202	211
	1	654	145	386	-	570	572	505	183	716	250	574	440	317
	2	215	508	225	570	-	134	224	414	156	354	392	391	283
	3	140	397	187	572	134	-	343	448	174	329	264	290	340
	4	422	593	317	505	224	343	-	322	358	378	568	519	192
	5	580	312	280	183	414	448	322	-	568	192	529	414	140
	6	66	554	345	716	156	174	358	568	-	486	414	462	438
	7	414	215	142	250	354	329	378	192	486	-	342	222	206
	8	80	140	272	574	392	264	568	529	414	342	-	137	483
	9	215	117	202	440	391	290	519	414	462	222	137	-	395
	10	480	410	211	317	283	340	192	140	438	206	483	395	-

3.4.1.2. Création de la matrice de rang

L'étape suivante consiste à créer la matrice de rang. C'est une matrice qui calcule des valeurs de transferts d'un arrêt à un autre. C'est une autre dimension de mesure autre que les distances qui utilise le classement hiérarchique des coordonnées d'un arrêt au lieu de ses coordonnées. Le tableau 3.13 explique comment obtenir ces valeurs de rang à partir des coordonnées des arrêts retenus. La valeur de transfert entre deux arrêts est la somme des différences des valeurs de rang en valeur absolue. Par exemple, pour calculer la valeur de transfert entre l'arrêt 1 et l'école, on effectue le calcul suivant : $|1-6| + |9-7|=7$. Le tableau 3.14 présente la matrice de rang pour les arrêts de l'instance exemple retenus avec la méthode actuelle de sélection.

Tableau 3.13 Obtention des valeurs de rang

		X	Y	Rang/ X	Rang/Y
Arrêts	École	300	300	6	7
	1	654	145	1	9
	2	215	508	7	3
	3	140	397	9	5
	4	422	593	4	1
	5	580	312	2	6
	6	66	554	11	2
	7	414	215	5	8
	8	80	140	10	10
	9	215	117	7	11
	10	480	410	3	4

Tableau 3.14 Matrice de rang

		Ran g/X	Rang/ Y	Arrêts										
				École	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arrêts	École	6	7	0	7	5	5	8	5	10	2	7	5	6
	1	1	9	7	0	12	12	11	4	17	5	10	8	7
	2	7	3	5	12	0	4	5	8	5	7	10	8	5
	3	9	5	5	12	4	0	9	8	5	7	6	8	7
	4	4	1	8	11	5	9	0	7	8	8	15	13	4
	5	2	6	5	4	8	8	7	0	13	5	12	10	3
	6	11	2	10	17	5	5	8	13	0	12	9	13	10
	7	5	8	2	5	7	7	8	5	12	0	7	5	6
	8	10	10	7	10	10	6	15	12	9	7	0	4	13
	9	7	11	5	8	8	8	13	10	13	5	4	0	11
	10	3	4	6	7	5	7	4	3	10	6	13	11	0

3.4.1.3. Calcul de la matrice des produits

Pour départager les valeurs identiques présentes dans la matrice de rang, il est proposé de multiplier les valeurs de la matrice de rang par la matrice De - À. Le résultat est la création d'une nouvelle matrice appelée la matrice des produits. Le tableau 3.15 présente le résultat de ce calcul.

Tableau 3.15 Matrice des produits

		Arrêts										
		École	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arrêts	École	-	2705	1123	936	2539	1401	3454	284	1904	1009	1266
	1	2705	-	6836	6869	5550	731	1217 6	1250	5740	3519	2219
	2	1123	6836	-	536	1119	3314	780	2479	3920	3128	1413
	3	936	6869	536	-	3091	3585	868	2303	1583	2319	2382
	4	2539	5550	1119	3091	-	2257	2865	3025	8514	6748	768
	5	1401	731	3314	3585	2257	-	7386	961	6345	4138	420
	6	3454	1217 6	780	868	2865	7386	-	5830	3728	6002	4383
	7	284	1250	2479	2303	3025	961	5830	-	2396	1109	1235
	8	1904	5740	3920	1583	8514	6345	3728	2396	-	548	6274
	9	1009	3519	3128	2319	6748	4138	6002	1109	548	-	4346
	10	1266	2219	1413	2382	768	420	4383	1235	6274	4346	-

3.4.1.4. Création du trajet

L'étape suivante vise à déterminer l'ordre de visite des arrêts le plus avantageux en termes de distance totale parcourue. À partir de l'école comme point de départ, le choix du prochain arrêt est déterminé par la valeur issue de la matrice des produits. La figure 3.15 présente les étapes nécessaires à la création du trajet.

Dans cet exemple, à partir des valeurs de la matrice des produits créée précédemment, en commençant par la ligne correspondant à l'école, on sélectionne la plus petite valeur produite (ici, 284 pour l'arrêt 7). Cet arrêt sera alors le deuxième à visiter. On retire la ligne et la colonne de l'école de la matrice. À partir de la ligne du dernier point (l'arrêt 7), on sélectionne encore une fois un autre point dont la valeur est la plus petite (ici, 961 pour l'arrêt 5). Cet exercice va se répéter jusqu'au dernier point. Il faut noter qu'une fois tous les arrêts sont visités, un retour vers l'école est exigé.

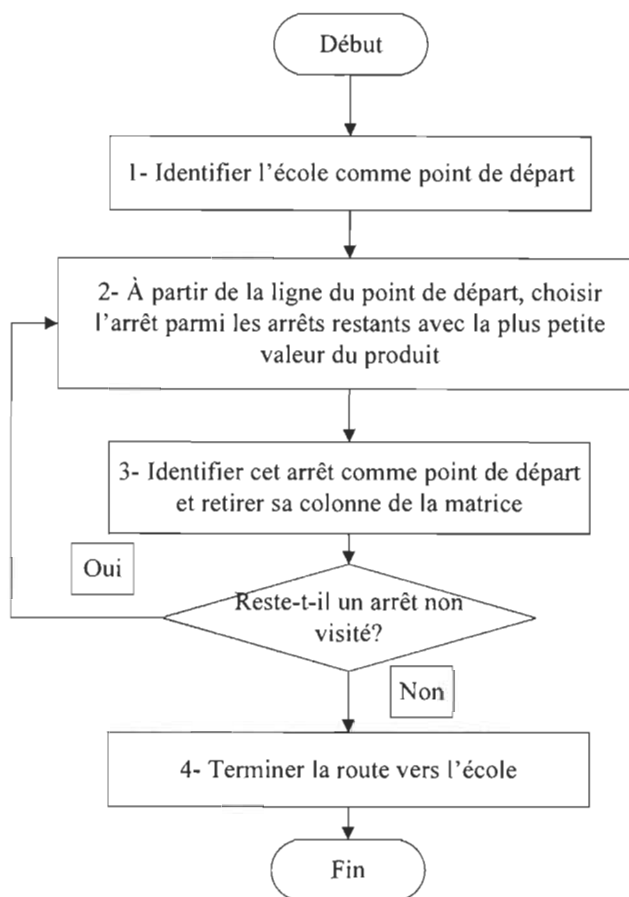


Figure 3.15 L'arborescence de la séquence du routage

La route finale obtenue pour cette instance exemple est présentée dans le tableau 3.16 :

Tableau 3.16 Solution de routage initial de l'instance exemple

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0
École	Arrêt 7	Arrêt 5	Arrêt 10	Arrêt 4	Arrêt 2	Arrêt 3	Arrêt 6	Arrêt 8	Arrêt 9	Arrêt 1	École

À chaque sélection d'arrêts dans la matrice des produits, un certain nombre de possibilités de choix d'arrêt sont disponibles. La figure 3.16 présente les possibilités de choix et la sélection faite dans le cas de l'instance exemple, pour un total de 2575 mètres parcourus.

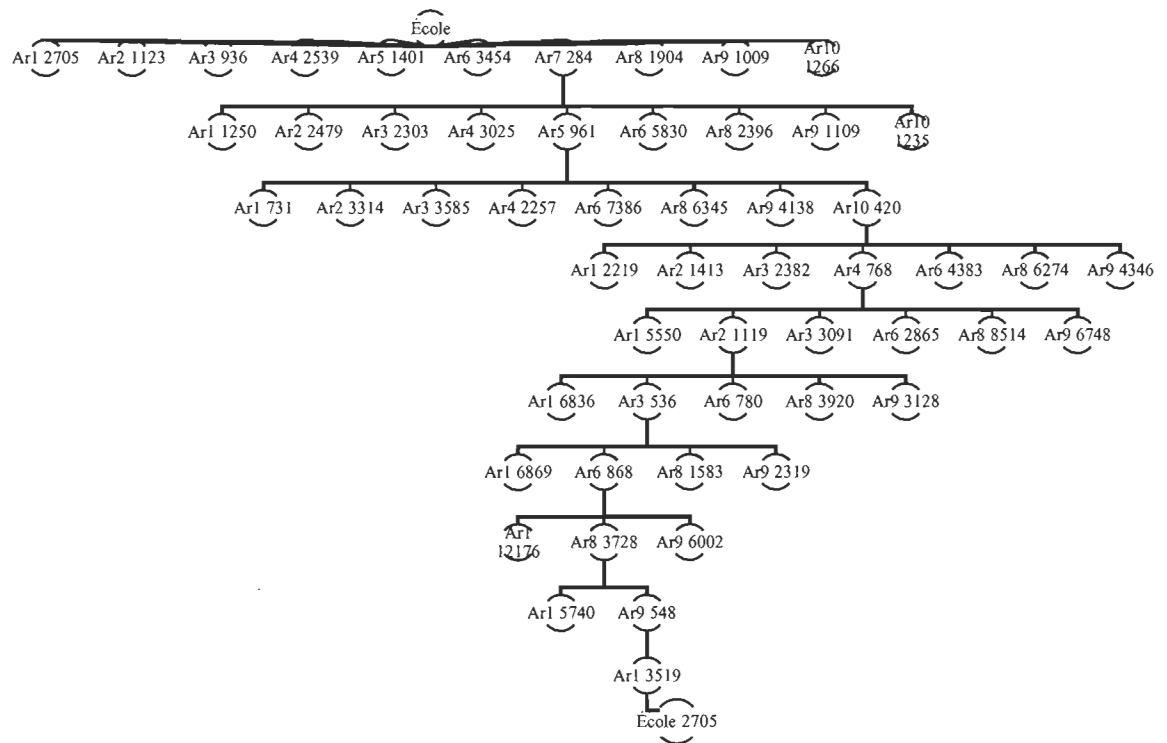


Figure 3.16 Arborescence de la séquence du routage

La figure 3.17 présente présente la vue géospatiale de la solution obtenue.

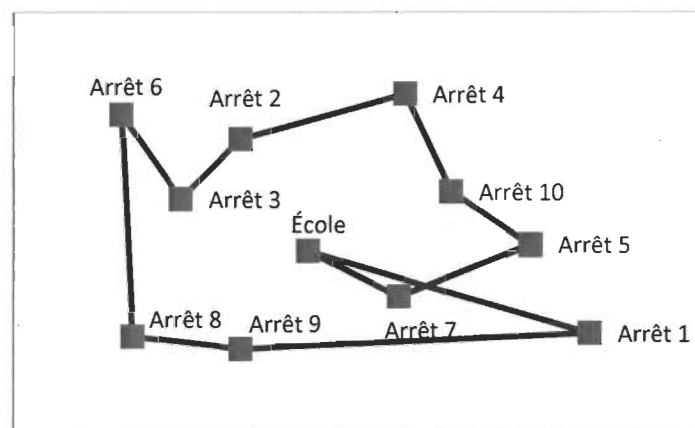


Figure 3.17 Résultat de la création du la route initiale

3.4.2. Amélioration de la route initiale

Suite à la création de la route initiale, on commence l'étape de l'amélioration. L'algorithme proposé utilise le principe de la recherche Tabou. Ce principe propose qu'à chaque itération, toutes les possibilités d'inversion d'arrêts soient vérifiées et le choix de la meilleure inversion est fait. On répète successivement de nouvelles itérations d'inversion, en gardant en mémoire la meilleure solution de routage obtenue. Lors d'une itération, si aucune inversion ne permet d'obtenir une meilleure solution que la meilleure solution obtenue jusqu'à maintenant, on effectue tout de même l'inversion. L'objectif est de faire une recherche variée, en évitant de limiter la recherche dans une région de solutions spécifique. En d'autres mots, il s'agit de sortir d'optimum locaux pour tenter de trouver l'optimal global. Pour éviter de revenir constamment au même optimal local préalablement visité, le principe du tabou propose l'utilisation d'une liste d'inversions interdites, appelée la liste tabou. D'une taille limite définie par le concepteur, la liste accumule les inversions passées et empêche d'effectuer l'inversion qui ramènerait exactement à la même solution qu'on vient de visiter. La figure 3.18 décrit les étapes de l'algorithme proposé.

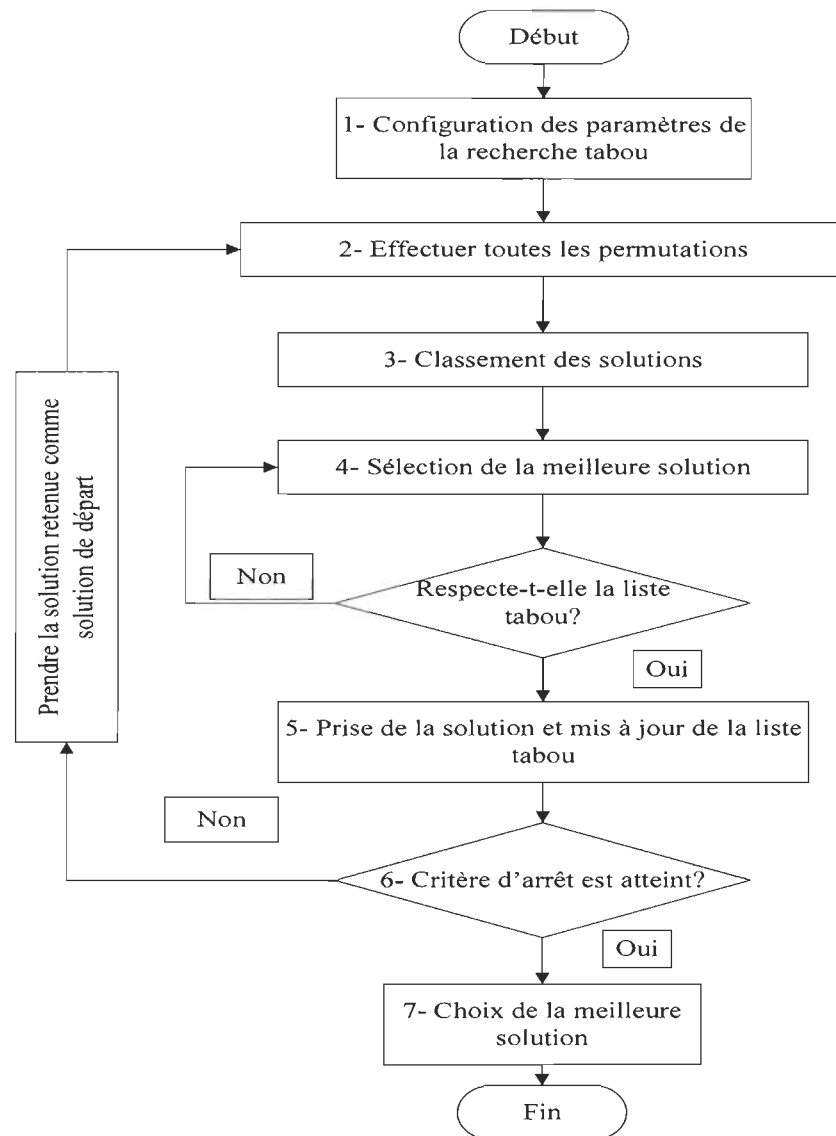


Figure 3.18 Étapes de l'amélioration de la route initiale

3.4.2.1. Configuration des paramètres de l'algorithme tabou

Pour la configuration de l'algorithme tabou utilisé, plusieurs essais de validation doivent être effectués pour trouver le meilleur compromis entre la diversification des solutions proposées en évitant de retourner vite vers le minimum local (la taille de la liste tabou et le critère d'arrêt) et l'intensification d'une solution (les conditions pour déterminer si un

mouvement est tabou). Le tableau 3.17 montre les paramètres utilisés pour l'algorithme tabou.

Tableau 3.17 Paramètres de l'algorithme tabou

Procédure de création des solutions	Algorithme d'inversion de deux arrêts à la fois
Mouvement tabou	Un des liens à ajouter est dans la liste tabou
Longueur de la liste tabou	12 liens ajoutés
Critères d'arrêt	20 itérations faites 10 itérations faites, suivi de 4 itérations consécutives sans amélioration

3.4.2.2. Effectuer les inversions

La permutation des arrêts des routes se fait par un algorithme de voisinage. En fait, il s'agit de vérifier la distance totale parcourue de chaque route issue d'une inversion. Toutes les inversions possibles à partir de la route initiale doivent être visitées. Le nombre de permutations possible dépend du nombre d'arrêts retenus lors de la sélection des arrêts. Dans le cas de l'instance exemple, pour les 10 arrêts retenus, il s'agit de vérifier 45 inversions. Le nombre d'inversions peut se calculer de la manière suivante :

$$\text{nombre de permutations} = \frac{\text{Nombre d'arrêts!}}{\text{Nombre de points permutés!} * (\text{Nombre d'arrêts} - \text{Nombre de points permutés})!} = \frac{10!}{2! * 8!} = 45$$

Le tableau 3.18 présente le résultat des 45 inversions issues de la route initiale proposée.

Tableau 3.18 Inversions possibles à partir de la route initiale

Position	Routes												Distance totale (m)	Permutation
1	école	5	7	10	4	2	3	6	8	9	1	école	2779	7 et 5
2	école	7	10	5	4	2	3	6	8	9	1	école	2719	5 et 10
3	école	7	5	4	10	2	3	6	8	9	1	école	2816	10 et 4
4	école	7	5	10	2	4	3	6	8	9	1	école	2875	4 et 2
5	école	7	5	10	4	3	2	6	8	9	1	école	2677	2 et 3
6	école	7	5	10	4	2	6	3	8	9	1	école	2447	3 et 6
7	école	7	5	10	4	2	3	8	6	9	1	école	2990	6 et 8
8	école	7	5	10	4	2	3	6	9	8	1	école	2757	8 et 9
9	école	7	5	10	4	2	3	6	8	1	9	école	2828	9 et 1
10	école	10	5	7	4	2	3	6	8	9	1	école	2830	7 et 10
11	école	7	4	10	5	2	3	6	8	9	1	école	2952	5 et 4
12	école	7	5	2	4	10	3	6	8	9	1	école	3056	10 et 2
13	école	7	5	10	3	2	4	6	8	9	1	école	2908	4 et 3
14	école	7	5	10	4	6	3	2	8	9	1	école	2687	2 et 6
15	école	7	5	10	4	2	8	6	3	9	1	école	2986	3 et 8
16	école	7	5	10	4	2	3	9	8	6	1	école	2968	6 et 9
17	école	7	5	10	4	2	3	6	1	9	8	école	2763	8 et 1
18	école	4	5	10	7	2	3	6	8	9	1	école	3025	7 et 4
19	école	7	2	10	4	5	3	6	8	9	1	école	3292	5 et 2
20	école	7	5	3	4	2	10	6	8	9	1	école	3448	10 et 3
21	école	7	5	10	6	2	3	4	8	9	1	école	3077	4 et 6
22	école	7	5	10	4	8	3	6	2	9	1	école	3045	2 et 8
23	école	7	5	10	4	2	9	6	8	3	1	école	3380	3 et 9
24	école	7	5	10	4	2	3	1	8	9	6	école	3115	6 et 1
25	école	2	5	10	4	7	3	6	8	9	1	école	3229	7 et 2
26	école	7	3	10	4	2	5	6	8	9	1	école	3587	5 et 3
27	école	7	5	6	4	2	3	10	8	9	1	école	3405	10 et 6
28	école	7	5	10	8	2	3	6	4	9	1	école	3360	4 et 8
29	école	7	5	10	4	9	3	6	8	2	1	école	3411	2 et 9
30	école	7	5	10	4	2	1	6	8	9	3	école	3204	3 et 1
31	école	3	5	10	4	2	7	6	8	9	1	école	3409	7 et 3
32	école	7	6	10	4	2	3	5	8	9	1	école	3556	5 et 6
33	école	7	5	8	4	2	3	6	10	9	1	école	3622	10 et 8
34	école	7	5	10	9	2	3	6	8	4	1	école	3441	4 et 9
35	école	7	5	10	4	1	3	6	8	9	2	école	3084	2 et 1
36	école	6	5	10	4	2	3	7	8	9	1	école	3238	7 et 6
37	école	7	8	10	4	2	3	6	5	9	1	école	3499	5 et 8
38	école	7	5	9	4	2	3	6	8	10	1	école	3399	10 et 9
39	école	7	5	10	1	2	3	6	8	9	4	école	3056	4 et 1
40	école	8	5	10	4	2	3	6	7	9	1	école	3198	7 et 8
41	école	7	9	10	4	2	3	6	8	5	1	école	2994	5 et 9
42	école	7	5	1	4	2	3	6	8	9	10	école	2710	10 et 1
43	école	9	5	10	4	2	3	6	8	7	1	école	2872	7 et 9
44	école	7	1	10	4	2	3	6	8	9	5	école	2678	5 et 1
45	école	1	5	10	4	2	3	6	8	9	7	école	2348	7 et 1

3.4.2.3. Classement et sélection de la meilleure solution

À partir de la liste de toutes les routes possibles suite à une inversion, on classe les solutions obtenues en fonction de la distance totale parcourue. Puis, on retient cette solution si aucun des liens ajoutés ne figure dans la liste tabou. Pour la première itération de l'amélioration de la route initiale, la meilleure solution retenue correspond à la permutation des arrêts 7 et 1, donnant une route d'une longueur totale de 2348 mètres. Les nouveaux liens 1 – 5 et 9 – 7 sont alors ajoutés à la liste tabou. Le tableau 3.19 présente le classement des 10 meilleures routes issues de la liste de toutes les inversions, en spécifiant les inversions et les liens ajoutés pour chacune de ces routes.

Tableau 3.19 Classement des dix meilleures solutions de la première itération

Routes												Distance totale	Permutation	Liens ajoutés			
école	7	5	10	4	2	3	6	8	9	1	école	2575					
école	1	5	10	4	2	3	6	8	9	7	école	2348	7 et 1	1-5	9-7		
école	7	5	10	4	2	6	3	8	9	1	école	2447	3 et 6	2-6	3-8		
école	7	5	10	4	3	2	6	8	9	1	école	2677	2 et 3	4-3	2-6		
école	7	1	10	4	2	3	6	8	9	5	école	2678	5 et 1	7-1	1-10	9-5	5-0
école	7	5	10	4	6	3	2	8	9	1	école	2687	2 et 6	4-6	2-8		
école	7	5	1	4	2	3	6	8	9	10	école	2710	10 et 1	5-1	1-4	9-10	10-0
école	7	10	5	4	2	3	6	8	9	1	école	2719	5 et 10	7-10	5-4		
école	7	5	10	4	2	3	6	9	8	1	école	2757	8 et 9	6-9	8-1		
école	7	5	10	4	2	3	6	1	9	8	école	2763	8 et 1	6-1	8-0		
école	5	7	10	4	2	3	6	8	9	1	école	2779	7 et 5	0-5	7-10		

Lorsqu'une solution est retenue et que la liste tabou est mise à jour, on effectue une nouvelle itération, cette fois en prenant la nouvelle route retenue comme route de départ. Lorsque la liste tabou atteint sa capacité maximale, les liens qui sont dans la liste depuis le plus de temps sont effacés et remplacés par les nouveaux liens ajoutés. Pour l'instance exemple et pour une capacité de la liste tabou de 12 liens ajoutés, on remarque que les liens ne commencent à quitter cette liste qu'à partir de la sixième itération. Le tableau 3.20 présente l'évolution de la liste tabou lors de la succession des différentes itérations effectuées.

Tableau 3.20 Évolution de la liste tabou au cours des itérations

Itérations	Listes tabou											
1	1 - 5	9 - 7										
2	2 - 6	3 - 8	1 - 5	9 - 7								
3	0 - 5	1 - 10	2 - 6	3 - 8	1 - 5	9 - 7						
4	0 - 1	5 - 10	0 - 5	1 - 10	2 - 6	3 - 8	1 - 5	9 - 7				
5	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	1 - 10	2 - 6	3 - 8	1 - 5	9 - 7		
6	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	1 - 10	2 - 6	3 - 8	1 - 5	9 - 7
7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	1 - 10	2 - 6	3 - 8
8	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	1 - 10
9	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10
10	10 - 1	5 - 4	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3
11	0 - 5	10 - 4	10 - 1	5 - 4	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3
12	0 - 1	5 - 10	0 - 5	10 - 4	10 - 1	5 - 4	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4
13	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	10 - 4	10 - 1	5 - 4	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7
14	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	10 - 4	10 - 1	5 - 4	3 - 8	9 - 7
15	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	10 - 4	10 - 1	5 - 4
16	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10	0 - 5	10 - 4
17	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3	0 - 1	5 - 10
18	10 - 1	5 - 4	3 - 8	9 - 7	3 - 9	8 - 7	0 - 10	1 - 4	4 - 2	6 - 3	4 - 6	2 - 3

3.4.2.4. Vérification du critère d'arrêt

L'algorithme s'arrête lorsqu'on atteint un des critères d'arrêt définis préalablement. On retient alors la meilleure solution trouvée au cours des itérations effectuées. Pour l'instance exemple, 18 itérations ont été réalisées avant d'atteindre le deuxième critère d'arrêt, soit quatre itérations consécutives sans amélioration et après dix itérations déjà faites. La meilleure route a été trouvée à la 14^e itération, pour une distance totale de 2219 mètres. Le tableau 3.21 présente le résultat de chaque itération effectuée, alors que le tableau 3.22 présente la route trouvée. La figure 3.19 présente la vue géospatiale de la solution obtenue.

Tableau 3.21 Résultats de chaque itération effectuée

Itération	Routes												Distance totale	Permutation	Liens ajoutés	
	école	7	5	10	4	2	3	6	8	9	1	école				
	école	1	5	10	4	2	3	6	8	9	7	école	2575			
1	école	1	5	10	4	2	3	6	8	9	7	école	2348	7 et 1	1-5	9-7
2	école	1	5	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2219	3 et 6	2-6	3-8
3	école	5	1	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2290	1 et 5	0-5	1-10
4	école	1	5	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2219	5 et 1	0-1	5-10
5	école	1	5	10	4	6	2	3	8	9	7	école	2314	2 et 6	4-6	2-3
6	école	1	5	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2219	6 et 2	4-2	6-3
7	école	10	5	1	4	2	6	3	8	9	7	école	2356	1 et 10	0-10	1-4
8	école	10	5	1	4	2	6	3	9	8	7	école	2503	8 et 9	3-9	8-7
9	école	10	5	1	4	2	6	3	8	9	7	école	2356	9 et 8	3-8	9-7
10	école	10	1	5	4	2	6	3	8	9	7	école	2351	5 et 1	10-1	5-4
11	école	5	1	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2290	10 et 5	0-5	10-4
12	école	1	5	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2219	5 et 1	0-1	5-10
13	école	1	5	10	4	6	2	3	8	9	7	école	2314	2 et 6	4-6	2-3
14	école	1	5	10	4	2	6	3	8	9	7	école	2219	6 et 2	4-2	6-3
15	école	10	5	1	4	2	6	3	8	9	7	école	2356	1 et 10	0-10	1-4
16	école	10	5	1	4	2	6	3	9	8	7	école	2503	8 et 9	3-9	8-7
17	école	10	5	1	4	2	6	3	8	9	7	école	2356	9 et 8	3-8	9-7
18	école	10	1	5	4	2	6	3	8	9	7	école	2351	5 et 1	10-1	5-4

Tableau 3.22 Solution de l'algorithme de routage

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0
École	Arrêt 1	Arrêt 5	Arrêt 10	Arrêt 4	Arrêt 2	Arrêt 6	Arrêt 3	Arrêt 8	Arrêt 9	Arrêt 7	École

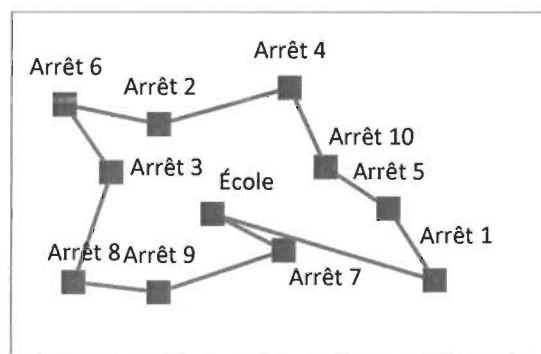


Figure 3.19 Présentation géospatiale de la route améliorée

3.5. Calcul des indicateurs de performances

La phase suivante est le calcul des indicateurs de performance. À partir de la route obtenue à la phase de routage, on mesure l'impact économique, l'impact environnemental et l'impact sur la santé des élèves. Pour y parvenir, on s'appuie sur des estimations des paramètres de calcul des indicateurs provenant des formules présentées dans la recension des écrits (chapitre 2). Pour l'estimation des valeurs numériques des autres paramètres comme la distance nécessaire pour atteindre la vitesse permise ou la distance nécessaire pour s'arrêter, on a utilisé les normes fournies par certains organismes, ainsi que les données utilisées par des chercheurs sur le sujet, le résumé de ces calculs est présenté au tableau 3.25.

➤ Consommation de carburant

Transport Canada propose dans son rapport un modèle mathématique pour l'estimation du taux de la consommation de carburant en fonction de la vitesse (Transport Canada, 2009), avec la formule suivante :

$$T_c = 255,331 * V^{-0.4753} \quad (1)$$

Pour calculer la consommation totale de carburant pour la phase de l'accélération, on s'est intéressé à la portion qui se trouve entre la vitesse 0 et 50 km/h. Ainsi, on peut déduire cette consommation par l'intégration de la formule (1) en fonction de la vitesse :

$$C_c = \int_0^{13,88} T_c(v) * dv$$

$$C_c = 111.5634 \text{ ml}$$

➤ Distance et temps nécessaires pour s'arrêter

La modélisation de la phase de décélération pour le poids lourd qui nous concerne est la suivante :

$$a = 1.587 * e^{(-0.017 * V)} ; V \text{ de } 13.89 \text{ m/s } (50 \text{ km/h}) \text{ vers } 0 \text{ (km/h)}$$

Pour la vitesse 50 km/h on aura :

- la décélération $a = 1.587 * e^{(-0.017 * 13.89)} = 1.253 \text{ m/s}^2$
- La distance nécessaire pour s'arrêter : $\Delta s = \frac{\overline{v_f^2} - \overline{v_i^2}}{2a} = 77 \text{ m}$
- Le temps de décélération : $t = \frac{\overline{v_f} - \overline{v_i}}{a} = 11 \text{ s}$

➤ Distance et temps nécessaires pour atteindre la vitesse permise

Ainsi, pour calculer l'accélération, on utilise les trois distances trouvées grâce aux trois tables (tableaux : 2.8, 2.9 et 2.10) nécessaires pour atteindre 50 km/h (13.9 m/s) à partir d'une situation d'arrêt, en plus de la formule :

$$a = \frac{\overline{v_f^2}}{2 \cdot \Delta s}$$

Suite à ces calculs, on obtient les résultats présentés dans le tableau 3.23. Pour la vitesse moyenne permise, on prendra 50 km/h, car c'est la vitesse adoptée dans la majorité des villes du Québec, avec quelques exceptions dans certains quartiers résidentiels.

Tableau 3.23 Distances pour atteindre 50 km/h selon les tables

	<i>Table Exhibit 10-70</i>	<i>Table NCHRP</i>	<i>Table DDC</i>
<i>Distance m</i>	150	180	94
<i>Accélération m/s²</i>	0,64	0,54	1,03

On prend les données issues de la table NCHRP, car elles sont plus conservatrices. Pour le temps nécessaire à la phase d'accélération, il peut être calculé avec l'équation suivante :

$$t = \frac{v - v_0}{a}$$

Donc, $t = 26$ secondes.

➤ Dégradation des pneus et freins

Le tableau 3.24 résume les taux moyens d'émission des particules en g/h pour un autobus urbain. Finalement, le tableau 3.25 présente un résumé des paramètres utilisés pour le calcul des indicateurs de performance.

Tableau 3.24 Les PM2.5 et PM10 moyennes pour les freins et pneus avec l'utilisation de MOVES 2014

<i>Mode</i>	<i>Taux d'émission moyen (g/h)</i>
<i>Freinage</i>	3,12434
<i>Ralenti</i>	0,04999
<i>1 ≤ Vitesse < 25</i>	3,12434
<i>25 ≤ Vitesse < 50</i>	2,0027
<i>50 ≤ Vitesse</i>	0,21246

Tableau 3.25 Estimation des paramètres de calcul des indicateurs

<i>Paramètres</i>	<i>Estimation numérique</i>
<i>Temps de la décélération (s)</i>	11
<i>Temps d'embarquement ou débarquement par élève (s)</i>	5
<i>Temps d'ouverture ou de fermeture des portes (s)</i>	3
<i>Temps de l'accélération (s)</i>	26
<i>Distance de la décélération (m)</i>	180
<i>Distance de l'accélération (m)</i>	77
<i>Vitesse moyenne (km/h)</i>	50
<i>Taux de consommation à 50 km/h (ml/m)</i>	0,398
<i>Taux de consommation pour l'accélération (ml)</i>	111,563
<i>Taux d'émission du carbone équivalent en fonction de la consommation (kg/l)</i>	3,667
<i>Taux d'émission moyen pour les freins et pneus en freinage (g/h)</i>	3,124
<i>Taux d'émission moyen pour les freins et pneus en accélération (g/h)</i>	2,563
<i>Taux d'émission moyen pour les freins et pneus à 50 km/h et plus (g/h)</i>	0,212

En plus de ces estimations, on utilise les résultats obtenus lors des phases précédentes, soit le nombre des arrêts, la distance totale du voyage et la distance totale marchée par les élèves.

À des fins de démonstration, les résultats des indicateurs présentés ici sont issus de l'instance exemple, en comparant les solutions de transport obtenues par la méthode dite actuelle (Géobus, sans regroupement des arrêts) et la méthode optimisée proposée (qui inclue le regroupement des arrêts). Le tableau 3.26 présente les détails des solutions obtenues selon les deux approches, une fois l'algorithme de routage appliqué.

Tableau 3.26 Solutions obtenues pour l'instance exemple

<i>Données</i>	<i>Méthode actuelle</i>	<i>Méthode optimisée</i>
<i>Nombre des arrêts</i>	10	6
<i>Distance totale du voyage (m)</i>	2219	1802
<i>Transport actif (m)</i>	1529	1870

3.5.2. Impact économique

Le tableau 3.27 présente le résultat des calculs d'indicateurs concernant l'impact économique. On note une diminution de 31 % de la consommation de carburant. Une baisse de 40 % a été mesurée pour la dégradation des freins et des pneus. Cette baisse contribue à prolonger la durée de vie des freins et des pneus et à alléger les coûts de maintenance. De plus, 30% de réduction de temps de voyage a été observé, ce qui a un impact direct sur les salaires versés à la main d'œuvre. Ces améliorations ont un impact direct sur les coûts d'exploitation du transport scolaire.

Tableau 3.27 Indicateurs économiques pour les deux méthodes de sélection

<i>Données</i>	<i>Méthode actuelle</i>	<i>Méthode optimisée</i>	<i>Variation</i>
<i>Consommation totale du carburant (l)</i>	1,12	0,77	31%
<i>Émission totale pour les freins et pneus (g)</i>	0,281	0,169	40%
<i>Le temps total du voyage (s)</i>	510	356,72	30%

3.5.3. Impact environnemental

Le tableau 3.28 donne les résultats du taux d'émission de GES avec les deux méthodes. On estime la baisse de l'émission des GES à 31 %. Puisque ces émissions ne se sont qu'une conséquence directe de la consommation de carburant, il est normal d'obtenir le même pourcentage d'amélioration que consommation de carburant. Cette amélioration aura un impact positif sur la qualité de l'environnement.

Tableau 3.28 Taux d'émission de GES par les deux méthodes

	<i>Méthode actuelle</i>	<i>Méthode optimisée</i>	<i>Variation</i>
<i>Émission du carbone équivalent (kg)</i>	4,09	2,833	31%

3.5.4. Impact sur la santé des élèves

Le tableau 3.29 donne les résultats du transport actif avec les deux méthodes de sélection. Pour l'instance exemple, on estime à 22% l'augmentation de la distance moyenne de marche de chaque élève. Cette amélioration contribue à la santé globale des élèves.

Tableau 3.29 Transport actif avec les deux méthodes

	<i>Méthode actuelle</i>	<i>Méthode optimisée</i>	<i>Variation</i>
<i>Transport actif moyen (m)</i>	96	117	22%

3.6. La variation de la distance de marche

La phase de variation de la distance de marche permet de vérifier l'impact de l'augmentation de la distance maximale de marche de l'élève vers l'arrêt d'autobus sur les indicateurs de performance. Le tableau 3.30 présente le résultat du calcul de ces indicateurs selon différentes limites de distance maximale de marche, soit 180 mètres (distance utilisée jusqu'à maintenant dans ce chapitre), 220 mètres, 260 mètres et 300 mètres. Pour ce qui est de la méthode actuelle, puisque l'élève est affecté à l'arrêt le plus

proche, les résultats obtenus pour la distance maximale de marche de 180 mètres vont demeurer les mêmes pour les autres distances maximales de marche.

Pour chaque variation, la méthodologie proposée exige de reprendre à la phase de sélection des arrêts (voir la figure 3.1), soit la phase de sélection des arrêts et la phase de routage.

Tableau 3.30 Synthèse des indicateurs selon la variation de la distance maximale de marche

	<i>Méthode de sélection</i>	<i>Méthode actuelle</i>	<i>Méthode optimisée</i>	<i>Méthode optimisée</i>	<i>Méthode optimisée</i>	<i>Méthode optimisée</i>
	Distance de marche (m)	180	180	220	260	300
<i>Indicateurs</i>	Nombre d'arrêts	10	6	5	5	4
	Distance totale de voyage (m)	2219	1802	1281	1281	1283
	Temps total du voyage (min)	15,5	12,95	11,92	11,92	11,5
	Consommation totale du carburant (l)	1,11	0,77	0,56	0,56	0,55
	Émission du carbone équivalent (kg)	4,1	2,8	2,05	2,05	2
	Émission totale pour les freins et pneus (mg)	280,61	169,47	140,3	140,3	113,33
	Distance totale marchée (m)	95,63	113,50	119,94	119,88	151,94

3.7. Analyse des résultats

La principale information qu'un gestionnaire doit retenir de ces résultats est que si l'on marche en moyen 59% de plus on peut sauver jusqu'à :

- un quart du temps total du voyage ;
- la moitié d'émission des GES ;
- la moitié d'émission de la consommation de carburant ;
- plus de la moitié de la dégradation des freins et des pneus ;
- une augmentation de la santé des élèves.

Le tableau 3.31 présente un résumé des gains possibles.

Tableau 3.31 Synthèse des taux de variation des indicateurs selon les taux de variation de la distance maximale de marche.

	Méthode de sélection	Méthode actuelle	Méthode optimisée			
			Taux d'augmentation			
	Distance de marche (m)	180	0,0%	22,2%	44,4%	66,7%
Indicateurs	Distance totale de voyage (m)	2219	18,8%	42,3%	42,3%	42,2%
	Temps total du voyage (min)	15,5	16,8%	23,2%	23,2%	25,8%
	Consommation totale du carburant (l)	1,11	30,6%	49,5%	49,5%	50,5%
	Émission du carbone équivalent (kg)	4.1	31,7%	50,0%	50,0%	51,2%
	Émission totale pour les freins et pneus (mg)	280,61	39,6%	50,0%	50,0%	59,6%
	Distance totale marchée (m)	95,63	18,7%	25,4%	25,4%	58,9%

Pour la baisse de la consommation de carburant, elle est tributaire de la réduction de la longueur totale de la route et la diminution du nombre d'arrêts. Cette baisse de consommation de carburant va induire une autre baisse de la même ampleur au niveau d'émission de GES. Pour la réduction des taux de dégradation des freins et des pneus, elle est expliquée par la diminution du nombre de freinages.

Pour comprendre la baisse du temps total du voyage, il faut savoir que ce temps est composé de deux paramètres. Le premier est les délais causés par le freinage pour s'arrêter, l'accélération pour atteindre la vitesse permise et embarquement et débarquement des élèves. Le deuxième est le temps de la conduite à la vitesse permise. La baisse du nombre d'arrêts, grâce à l'algorithme d'optimisation, a réduit d'une façon directe les délais et a augmenté le temps de voyage à la vitesse permise.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSE

Dans ce chapitre, chaque étape de la méthodologie présentée au chapitre précédent est reprise, mais cette fois-ci, en utilisant une instance artificielle (SSSS-s20-U100-c25-w10) de taille réaliste développée par l'Université d'Antwerp en Belgique. Cette instance comporte une école, 100 élèves et 20 arrêts. Les adresses de résidence des élèves sont distribuées dans un espace carré de 100 unités de longueur. Pour des raisons de réalisme, cet espace a été agrandi pour couvrir 6,25 km², soit en multipliant les coordonnées de chaque adresse d'élève par 25.

4.1. Application de l'algorithme optimisé sur une instance réaliste

Pour la phase de collecte des données, on trouve à l'annexe 2 la liste complète des adresses utilisées ainsi la représentation de cette instance de validation. La phase de sélection des arrêts est présentée à l'annexe 3 où l'on a utilisé la méthode actuelle de sélection et l'algorithme optimisé de sélection des arrêts. À la phase de routage, on a exécuté l'algorithme de glouton et la recherche tabou pour générer des routes pour les deux ensembles d'arrêts issus des deux méthodes de sélection le résultat est présenté à l'annexe 4. Pour la solution obtenue, on a calculé les indicateurs de performance (économiques, environnementaux et transport actif). Par la suite, la méthodologie a été répétée, mais en modifiant la distance maximale de marche : d'abord une limite initiale de 250 mètres (obtenue suite à la multiplication de 10 par 25), puis augmentée progressivement de 10 %, 30 % et 50 % (respectivement 280, 320 et 370 mètres). Les détails des calculs sont présentés à l'annexe 4. Pour réaliser ces phases, on a utilisé un logiciel développé à l'aide du langage de programmation VBA, dont la programmation ainsi certaines vues sont présentées aux annexes 5 et 6.

4.2. Calcul des indicateurs

Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus et montre la variation des indicateurs par rapport à différentes limites de distance maximale de marche.

Tableau 4.1 Résultats obtenus

<i>Indicateurs</i>	<i>Type de méthode</i>				
	Méthode actuelle	Méthode optimisée			
<i>Distance de marche</i>	250	250	280	320	370
<i>Nombre d'arrêts</i>	19	18	16	12	11
<i>Distance totale de voyage (km)</i>	10,1	9,61	8,36	7,81	7,29
<i>Temps total du voyage (min)</i>	28,2	27,22	24,9	22,6	21,58
<i>Consommation totale du carburant (l)</i>	4,2	3,99	3,48	3,22	3,01
<i>Émission du carbone équivalent (kg)</i>	15,4	14,62	12,74	11,8	11,01
<i>Émission totale des particules des freins et des pneus (mg)</i>	555,3	526,3	467,03	356,8	327,7
<i>Distance moyenne marchée par élève (m)</i>	106	115	138	162	177

4.2.1. Impact économique

Comme présenté au tableau 4.2, les distances parcourues par l'autobus scolaire diminuent lorsqu'on augmente la limite maximale de marche de l'élève vers son arrêt, induisant une baisse au niveau de la consommation du carburant (figure 4.1). Pour une augmentation de la limite maximale de marche de 48 % de la limite initiale, la consommation du carburant a chuté de 28,3%. Pour expliquer cette baisse, il faut savoir que la consommation de carburant dépend de deux paramètres, soit la distance parcourue de la route et le nombre d'arrêts. Étant donné que l'algorithme d'optimisation a baissé le nombre des arrêts en comparaison avec la méthode actuelle, cette baisse a réduit directement la fréquence des accélérations et des décélérations et la longueur totale parcourue, car avec moins d'arrêts à visiter, on diminue la distance parcourue.

Tableau 4.2 Taux de variation des indicateurs en fonction de la limite de marche

	Méthode de sélection	Méthode actuelle	Méthode optimisée			
			Taux de variation			
	Distance de marche (m)	250	0,0%	12,0%	28,0%	48,0%
Indicateurs	Distance totale de voyage (km)	10,1	4,9%	17,2%	22,7%	27,8%
	Temps total du voyage (min)	28,2	3,5%	11,7%	19,9%	23,5%
	Consommation totale du carburant (l)	4,2	5,0%	17,1%	23,3%	28,3%
	Émission du carbone équivalent (kg)	15,4	5,1%	17,3%	23,4%	28,5%
	Émission totale des particules des freins et des pneus (mg)	555,3	5,2%	15,9%	35,7%	41,0%
	Distance moyenne marchée par élève (m)	106	8,5%	30,2%	52,8%	67,0%

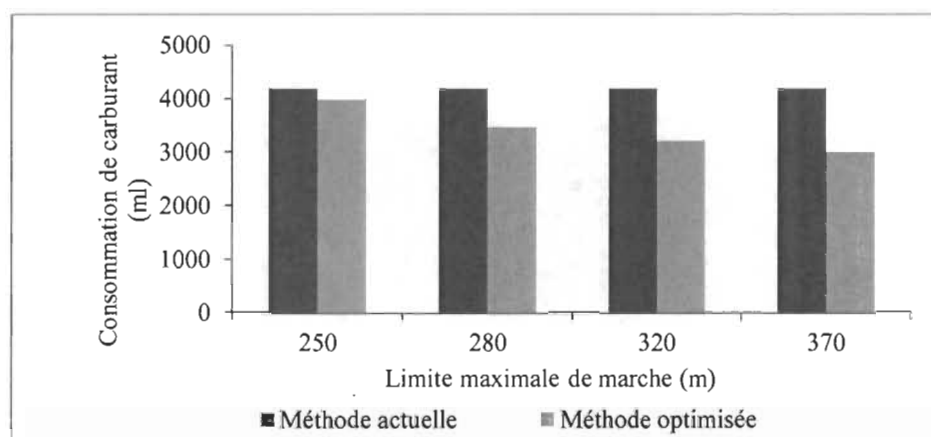


Figure 4.1 Consommation du carburant en fonction de la distance de marche

Le tableau 4.2 montre une amélioration de 23,5% du temps total du voyage, quand on utilise la méthode optimisée et que l'on modifie la limite de la distance de marche (figure 4.2). Cette amélioration peut être expliquée par la diminution du nombre d'arrêts. D'une part, elle réduit les délais causés par les décélérations, les accélérations, les

embarquements et débarquements des élèves, et par conséquent permet à l'autobus d'atteindre rapidement sa vitesse permise. D'autre part, elle diminue la longueur totale de la route du fait qu'on a moins d'arrêts à visiter. La réduction de temps de voyage correspond à une réduction du temps de travail du chauffeur d'autobus. Par conséquent, une réduction du coût de la main-d'œuvre et une opportunité de planifier plus de voyage avec les mêmes ressources pour les gestionnaires du transport scolaire.

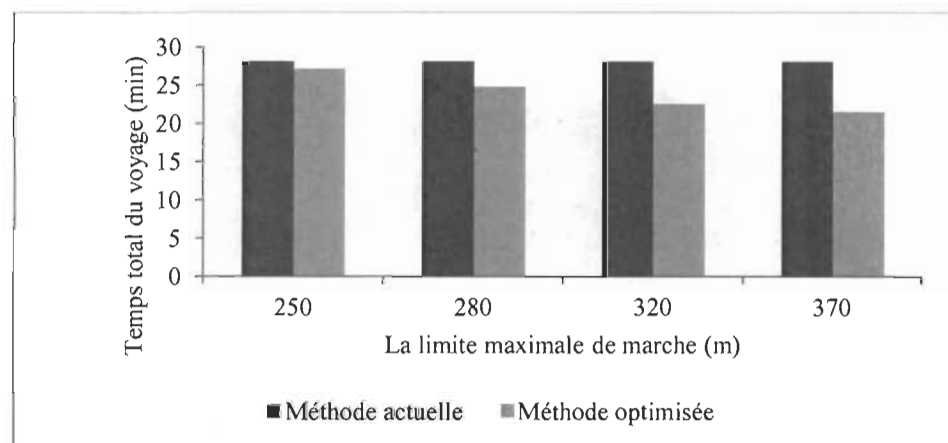


Figure 4.2 Variation du temps du voyage en fonction de la distance de marche

Comme autre indicateur à vocation économique, on cite le taux d'émissions total des particules des pneus et des freins qui reflète le niveau de dégradation de ces deux composantes très sollicitées dans un autobus, et qui sont sujettes de plusieurs interventions de maintenance. Ainsi, comme présenté au tableau 4.2, on peut constater une réduction de 41% de cette dégradation suite à l'augmentation de la distance de marche et l'utilisation de l'algorithme optimisé (figure 4.3). Le calcul de l'usure des freins et des pneus exige la prise en considération du mode de freinage, du mode d'accélération et du mode de conduite à la vitesse moyenne du chauffeur de l'autobus. Puisque la diminution des arrêts réduit la fréquence des accélérations et des décélérations, on constate aussi une diminution du taux d'usure des freins et des pneus.

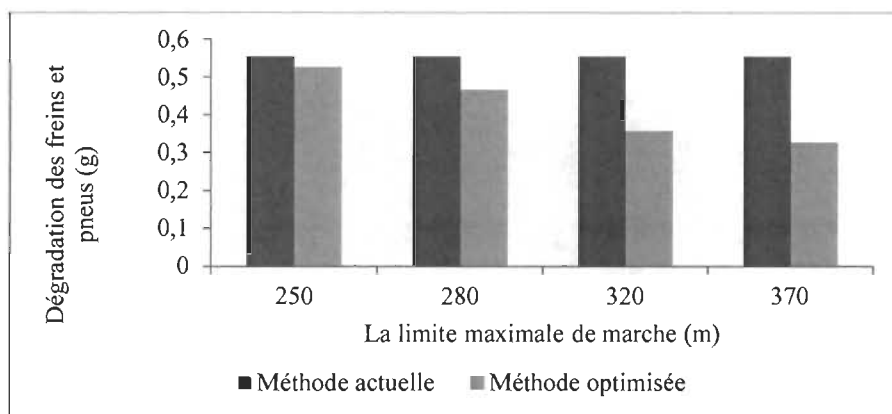


Figure 4.3 Dégradation des pneus et freins en fonction de la distance de marche

4.2.2. Impact environnemental

Le tableau 4.2 montre que suite à l'augmentation de la limite maximale de marche, on constate une diminution d'émission des GES. Plus précisément, on remarque qu'une augmentation de la limite maximale de marche de 48 % de la limite initiale (de 250 mètres à 370 mètres) a diminué de 28% d'émission des GES (figure 4.4). Par contre, dans le cas de l'utilisation de la méthode actuelle, le changement de la distance de marche n'a pas d'effet sur l'émission des GES, puisque la distance de marche n'a pas d'impact sur la solution de transport trouvée. Pour expliquer cette baisse, il faut savoir que l'émission des GES est une conséquence directe de la baisse de la consommation du carburant calculée dans les sous-sections précédentes.

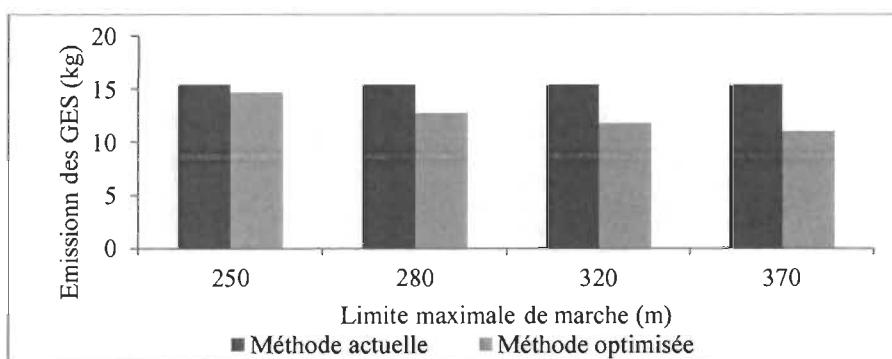


Figure 4.4 Émissions de GES en fonction de la distance de marche

4.2.3. Impact sur le transport actif

Pour les 100 élèves de cette instance, l'augmentation de la limite de la distance de marche se manifeste par une augmentation de la distance totale marchée. En effet, selon le tableau 4.1, la distance moyenne marchée par élève est passée de 106 mètres à 177 mètres, soit une augmentation de 66% (figure 4.5). Cette augmentation pourrait avoir un effet bénéfique sur la santé globale des élèves, sachant que cette distance est parcourue deux fois par jour d'école, 180 jours par année.

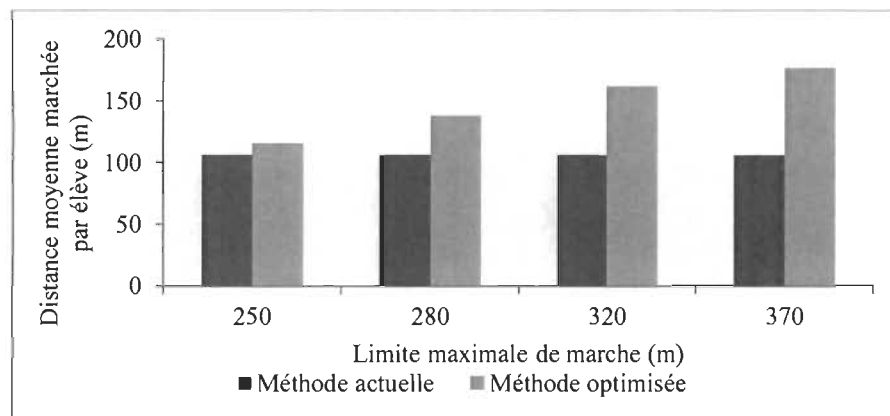


Figure 4.5 Variation de la distance moyenne marchée par élève en fonction de la distance de marche

4.3. **Analyse des résultats**

4.3.1. Analyse statistique

Dans le cas de l'instance de validation (100 élèves et 20 arrêts), l'utilisation de la méthode optimisée intégrant le regroupement des arrêts améliore considérablement les indicateurs de performance, comparativement à l'utilisation de la méthode actuelle. De plus, associée à la variation de la distance de marche, on obtient des réductions qui peuvent atteindre jusqu'à 28% au niveau de la consommation de carburant et de l'émission des GES, jusqu'à 24% du temps de voyage, jusqu'à 41% pour le taux de dégradation des freins et des pneus, et jusqu'à 66% d'augmentation du transport actif. L'analyse des données faite sur le logiciel Minitab a montré que la variation des indicateurs par rapport à la limite maximale

de marche suit une courbe de tendance linéaire positive avec de bons coefficients de détermination qui varient entre 0,90 et 0,96 et des coefficients directeurs des droites de régression positifs, ce qui indique une bonne relation de dépendance entre la limite maximale de marche et les indicateurs de performance. Les détails de cette analyse étant présentés à l'annexe 7. Le tableau 4.3 présente un résumé des indices de régression obtenus.

Tableau 4.3 Les paramètres de la régression linéaire

	α	β	R^2
<i>Temps total du voyage</i>	0,4134	0,05585	92,9%
<i>Émission du carbone équivalent et Consommation totale du carburant</i>	0,4615	0,08297	90%
<i>Émission totale des particules des freins et des pneus</i>	0,7764	0,07384	92,6%
<i>Distance moyenne marchée par élève</i>	1,211	0,1297	96%

La figure 4.6 présente l'évolution des indicateurs selon la variation de la limite de distance maximale de marche.

4.3.2. Analyse économique

Pour l'analyse économique, les données relatives à une commission scolaire moyenne ont été utilisées. Cette commission scolaire accueille 15 000 jeunes de niveaux préscolaire, primaire et secondaire, dont 11 500 élèves utilisent le transport scolaire quotidiennement. Le territoire couvert comporte 55 écoles, réparties sur 20 municipalités. Sur un budget annuel d'environ 200 M\$, la commission scolaire dépense annuellement environ 11 M\$ pour financer le transport scolaire, assuré par une flotte de plus de 200 véhicules qui parcourent une distance d'environ 19 250 km par jour. Les tableaux 4.4 et 4.5 résument les données nécessaires pour l'estimation économique.

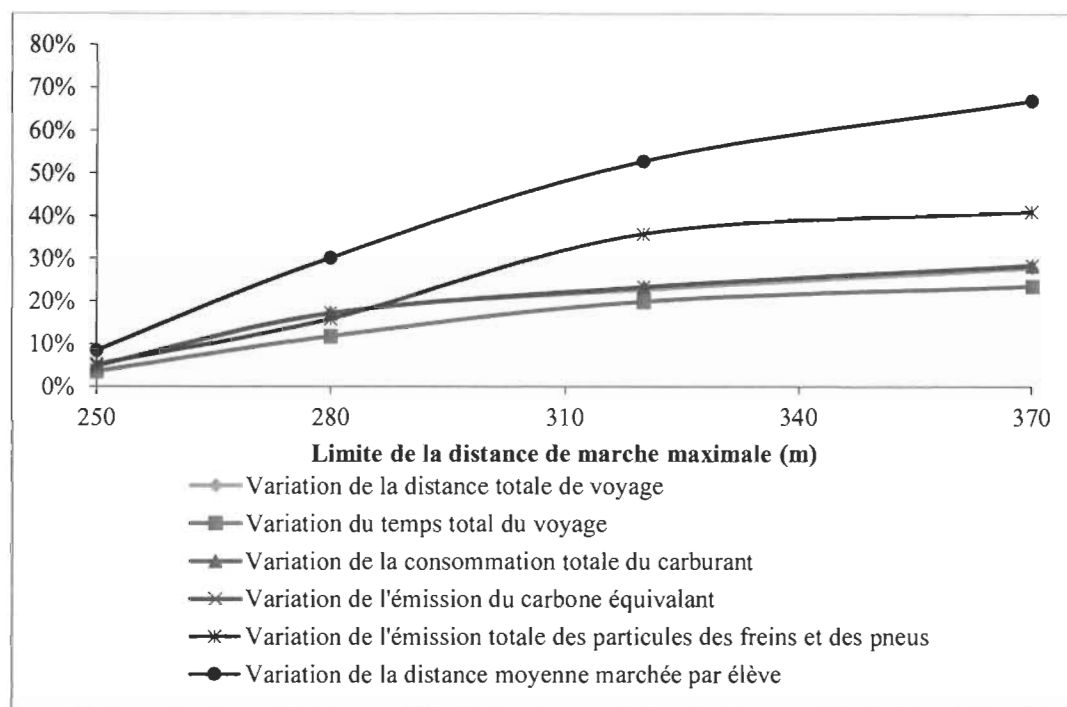


Figure 4.6 Évolution des indicateurs de performance en fonction de la limite de la distance de marche

Tableau 4.4 Nombre de véhicules de transport d'élèves par type

Transporteurs	Nombre véhicules		
	Autobus à 12 rangées (72 places)	Autobus à 5 rangées (20 places)	Voiture (4 places)
31	147	45	23

Tableau 4.5 Critères d'admissibilité au transport scolaire

Types de véhicule	Coût annuel	Coût moyen km/jour
12 rangées (72 places)	51 000 \$	0,63 \$/km
5 rangées (20 places)	45 000 \$	0,405 \$/km

L'estimation économique est faite seulement sur les gains réalisés par rapport aux économies potentielles sur la consommation de carburant, ce qui exclut les économies

reliées à la dégradation des freins et des pneus, en raison du manque de données sur le service de maintenance des autobus.

Alors si on applique les mêmes taux de variation de la limite maximale de marche sur la limite de marche actuellement en vigueur à la commission scolaire qui est de 400 mètres, et on utilise les mêmes taux d'amélioration des distances totales parcourues. On peut estimer les gains potentiels dans le cas de l'adoption de la méthode optimisée proposée sans aucun changement au niveau de la limite de marche puis dans le cas de l'association de la méthode proposée et des changements de la limite de marche.

Le tableau 4.6 résume les estimations du gain potentiel selon les limites de marche. On y trouve qu'environ 100 000\$ de gain potentiel si on applique seulement la méthode optimisée et 6 fois ce gain si on utilise la méthode optimisée avec une augmentation de la limite de marche de la moitié. De plus, si on utilise le gain par élève pour estimer le gain potentiel à l'échelle de la province de Québec, on trouve plus de 27 M\$ de gain.

Tableau 4.6 Le calcul du coût par rapport à la distance de marche

	Méthode actuelle	Méthode optimisée			
% d'augmentation de la limite de marche	0%	0%	12%	28%	48%
Coût variable (\$)	2 181398	2 075023	1 806644	1 686638	1 575359
Gain potentiel (\$)		106376	374754	494761	606040
Gain par élève par année (\$)		9,25	32,59	43,02	52,70

4.3.3. Discussion

Les résultats obtenus montrent que le regroupement des arrêts et l'augmentation de la distance de marche améliorent tous les indicateurs de performance. Certes, le regroupement des arrêts améliore les indicateurs de performance, mais c'est l'augmentation de la distance de marche qui entraîne le plus grand impact au niveau des

indicateurs. Ainsi, pour chaque mètre de marche ajouté, des économies sont réalisées, qui peuvent être ensuite utilisées pour équilibrer les budgets des commissions scolaires. L'augmentation de la distance maximale de marche entraîne aussi d'importants impacts environnementaux et sur la santé globale des élèves.

Il ressort de cette étude l'importance pour une commission scolaire de se doter de moyens pour évaluer l'impact de certains changements au niveau de la planification du transport scolaire, entre autres au niveau du regroupement des arrêts d'autobus et de la distance maximale de marche des élèves vers ces arrêts. Une méthodologie comme celle proposée dans ce mémoire permet aux gestionnaires d'avoir des données en main pour discuter des possibilités de changement et, ultimement, apporter les meilleurs changements possibles aux politiques de transport scolaire en place.

Par exemple, la politique actuelle généralement admise est que la limite de distance de marche est considérée comme une contrainte rigide. En utilisant cette distance maximale de marche de façon plus flexible et en calculant son impact sur différents indicateurs, on parvient à susciter des discussions constructives entre les gestionnaires.

CONCLUSION

Le but de ce mémoire consistait à proposer une méthodologie de mesure des impacts du regroupement des arrêts et de la variation de la limite maximale de marche vers les arrêts d'autobus. Plusieurs indicateurs de performances ont été utilisés pour mesurer ces impacts selon le plan économique, environnemental et sanitaire. Pour y arriver, des algorithmes d'optimisation ont été développés, optimisant plus particulièrement la sélection des arrêts et le routage. Des instances artificielles ont été utilisées pour expliquer la méthodologie, pour calculer et analyser les résultats et pour faire une comparaison de performance entre la méthode actuelle de sélection des arrêts utilisée par les commissions scolaires et les algorithmes d'optimisation proposés. Finalement, la distance maximale de marche des élèves vers les arrêts a été modifiée plusieurs fois, pour en mesurer les impacts.

À la suite de l'analyse des résultats, on a pu conclure que le regroupement des arrêts et l'augmentation de la limite maximale de marche améliorent considérablement les indicateurs de performance. Par conséquent, on peut affirmer l'importance pour les décideurs d'utiliser une méthodologie comme celle présentée dans ce mémoire pour revoir les politiques et améliorer la performance du transport scolaire.

Quoique la méthodologie proposée peut être intéressante pour les gestionnaires des commissions scolaires, ce mémoire comporte certaines limites qu'il est nécessaire d'évoquer. En autres, la variation des capacités des différents autobus scolaires n'a pas été prise en compte. De plus, la méthodologie n'a pas été testée sur des instances réelles. Il aurait été intéressant de mesurer les impacts prévus pour une commission scolaire existante, pour appuyer le propos.

Pour poursuivre les travaux entrepris, trois recommandations sont proposées. La première concerne l'intégration de la notion de capacité des autobus et l'analyse de l'impact de la variation de la capacité des autobus sur les indicateurs de performance. La deuxième porte sur le choix des outils d'optimisation privilégiés. Il serait intéressant de tenter l'utilisation

d'algorithmes de colonie de fourmis pour le routage initiale et d'algorithmes génétiques pour l'amélioration des solutions. Finalement, il serait intéressant de pousser l'analyse économique pour obtenir des estimations plus précises des gains possibles. Ceci aiderait à conscientiser les gestionnaires sur l'impact des politiques actuelles sur les coûts du transport, sur la trace environnementale et sur la santé des élèves.

RÉFÉRENCES

- Agence de la santé publique du Canada. (2014). Mobilisation des connaissances sur le transport actif. Consulté le 20 mai 2016, tiré de <http://www.phac-aspc.gc.ca/hp-ps/hl-mvs/pa-ap/mobil-transport-fra.php>
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO (2001). A policy on geometric design of highways and streets. Consulté le 12 octobre 2016, tiré de http://nacto.org/docs/usdg/geometric_design_highways_and_streets_aashto.pdf
- Bektaş, T., & Elmastaş, S. (2007). Solving school bus routing problems through integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12), 1599-1604.
- Ben Sghaier, S., Ben Guedria, N., & Mraihi, R. (2013). Solving School Bus Routing Problem with genetic algorithm. *International Conference on Advanced Logistics and Transport*, Sousse-Tunisia.
- Binato, S., Hery, W. J., Loewenstren, D. M., & Rescende M. G. C. (1995). A Grasp for Job Shop Scheduling. *Essays and Surveys in Metaheuristics*, 15, 59-79.
- Bodin, L. D., & Berman, L. (1979). Routing and scheduling of school buses by computer. *Transportation Science*, 13(2), 113-129.
- Boulter, P. G. (2009). Emission factors 2009: Final summary report. *The department for transport*. Consulté le 22 janvier 2016, tiré de https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/4254/summaryreport.pdf
- Bowerman, R, Hall, B, & Calamai, P. (1995). A multi-objective optimization approach to urban school bus routing : formulation and solution method. *Transportation Research Part A* 29, 107-23.
- Braca, J., Bramel, J., Posner, B., & Simchi-Levi, D. (1997). A computerized approach to the New York City school bus routing problem. *IIE Transactions* 29, 693-702.

Environnement et Changement climatique Canada. (2016). *Deuxième rapport biennal du CANADA sur les changements climatiques*. Canada: Environnement et Changement climatique Canada. Consulté le 12 mai 2016, tiré de <https://www.ec.gc.ca/GES-GHG/default.asp?lang=Fr&n=02D095CB-1>

Transport Canada. (2009). Programme de démonstration en transport urbain Études de cas sur les transports. Consulté le 24 décembre 2016, tiré de <https://www.tc.gc.ca/fra/programmes/environnement-pdtu-menu-964.htm>

Transport Canada. (2012). *Les transports au Canada 2012* (TP 14816). Canada: Transports Canada. Consulté le 26 août 2016, tiré de https://www.tc.gc.ca/media/documents/politique/Transportation_in_Canada_2012_fra_ACCESS.pdf

Cao, Q., Friswell, M. I., Ouyang, H. J., Montttershead, J. E., & James, S. (2003). Car Disc Brake Squeal: Theoretical and Experimental Study. *Materials Science Forum*, 440-441, 269-277.

Caric, T., Fosin, J., Galic, A., Gold, H., & Reinholz, A. (2007). Empirical analysis of two different metaheuristics for real-world vehicle routing problems. *Lecture Notes in Computer Science*, 4771, 31-44.

Casey, E., & Gray, R. L. (2013). Are We Driving Our Kids to Unhealthy Habits? Results of the Active Healthy Kids Canada 2013 Report Card on Physical Activity for Children and Youth. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6009- 6020.

Chamroukhi, F. (2014). Algorithme des centres moblies (K-means) pour la classification automatique. Toulon: Université de Toulon. Consulté le 6 juin 2016, tiré de <http://cyberg.wits.ac.za/cb2005/>

Chamroukhi, F., Bartcus, M., & Glotin, H. (2014). Bayesian Non-parametric Parsimonious Gaussian Mixture for Clustering. *22nd European Symposium on Artificial*

Neural Networks, 571 - 576. Marseille: The International Conference on Pattern Recognition.

Chen, D., Kallsen, H.A., & Snider, R.C. (1988). School bus routing and scheduling: An expert system approach. *Computers and Industrial Engineering* 15, 179–183.

Chevereau E, Cosson, Y., Frénal, A., Monnier, B., Prieur, F., & Trojani, J. (2002). *Simulation de l'échauffement d'un disque de frein d'une moto de compétition sous Star-CD* (Projet de formation, Université de Maine, Laval, QC, Canada). Consulté le 12 novembre 2016, tiré de http://perso.univ-lemans.fr/~fcalvay/projetsmnr/freinage_competition.htm

Chien, S. I., & Qin, Z. (2004). Optimization of bus stop locations for improving transit accessibility. *Transportation Planning and Technology*, 27, 211-227.

Chien, S. L. (2004). Optimisation of bus stop location for improving transit accessibility. *Transportation planning and technology*, 211-227.

De Souza, L. V., & Siqueira, P. H. (2010). Heuristic methods applied to the optimization school bus transportation routes : A real case. *Lecture Notes in Computer Science*, 6097, 247-256.

Demiral, M. F., Gungor, I., & Oruc, K. O. (2008). Optimization at service vehicle routing and a case study of Isparta, Turkey. *ICME - International Conference on Management and Economics*. Isparta, Turkey: Epoka University. Consulté le 28 janvier 2016, tiré de <http://dspace.epoka.edu.al/handle/1/115>

Desrosiers, J., Soumis, F., Desrochers, M., & Sauvé, M. (1984). Routing with time windows by column generation. *European Journal of Operational Research Networks* 14(4), 545-565.

Detroit Diesel Corporation. (2009). ENGINE OPERATOR'S MANUAL. In *EPA10 DD Platform Operators Manual* (pp. 1-145) Consulté le 10 janvier 2016, tiré de http://www.crengland.com/sites/default/files/assets/files/Service_Manuals/dd15.pdf

Diaz-Parra, O., Ruiz-Vanoye, J. A., Buenabad-Arias, A., & Cocon, F. R. j. (2012). A vertical transfer algorithm for the School Bus Routing Problem. *The 2012 4th World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, 66-71. Consulté le 12 octobre 2016, tiré de <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6402241/?reload=true>

Dridi., I. H. (2010). *Optimisation heuristique pour la résolution du m-PDPTW statique et dynamique* (Thèse, université de Tunis el Manar École Centrale de Lille, école nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisie). Consulté le 19 février 2016, tiré de https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjEkcq8hqDSAhWI2YMKHevGBHkQFggkMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.cnudst.rnrt.tn%2Fjortsrc%2F2010%2F2010f%2Fjo1042010.pdf&usg=AFQjCNEj695hyIVSBQ6S8XuuOKMgp8XteQ&sig2=iEs6nxUvQ8VnmooA4f75_A

Dulac, G, Ferland, J.A, & Forgues, P.A. (1980). School bus routes generator in urban surroundings. *Computers & Operations Research* 7, 199–213.

Réseau Environnement. (2007). Mémoire présenté dans le cadre de la consultation publique sur la stratégie gouvernementale de développement durable. Consulté le 15 mars 2016, tiré de http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/strategie_gouvernementale/memoires/153D.pdf

Eldrandaly, K. A. (2012). A novel GIS-based decision-making framework for the school bus routing problem. *Geo-Spatial Information Science*, 51-59.

Environmental Protection Agency. (2014). *Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014* (EPA-420-R-14-013). U.S.: Environmental Protection Agency. Consulté le 24 juin 2016, tiré de https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=525701

Euchi, J., & Mraïhi, R. (2012). The urban bus routing problem in the Tunisian case by the hybrid artificial ant colony algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2, 15-24.

- Fisher, M. (1995). Vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 8, 1–33.
- Fishman, E., Bocker, L., & Helbich, M. (2015). Adult Active Transport in the Netherlands: An Analysis of Its Contribution to Physical Activity Requirements. *PLOS ONE*. Consulté le 26 juin 2016, tiré de <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0121871>
- Fügenschuh, A. (2009). Solving a school bus scheduling problem with integer programming. *European Journal of Operational Research* 193(3), 867–884.
- Ghiani, G., & Laporte, G. (2000). A branch-and-cut algorithm for the Undirected Rural Postman Problem. *European Journal of Operational Research*, 87, 467-481.
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 Incidences, adaptation et vulnérabilité* Consulté le 6 juin 2016, tiré de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf
- Gouvernement du Québec. (2014). *Rapport annuel de gestion 2013-2014*. (ISBN 978-2-550-71336-4). Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014 Consulté le 6 juin 2016, tiré de http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/PSG/politiques_orientations/RAG_2013-2014p.pdf
- IRSST. (2009). L'éclatement et l'explosion des pneus de véhicules lourds. *Fiche technique destinée au personnel affecté à la réparation et à l'entretien de véhicules lourds*, 3-11. Consulté le 05 juillet 2016, tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-568.pdf>
- Kim, B. I., Kim, S., & Park, J. (2012). A school bus scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 218(2), 577-585.

- Kinable, J., Spieksma, F. C. R., & Vanden Berghe, G. (2014). School bus routing-a column generation approach. *International Transactions in Operational Research*, 21(3), 453-478.
- Lenstra, J. K., & Kan, R. (1984). Two Open Problems in Precedence Constrained Scheduling. *North-Holland Mathematics Studies*, 99, 509-521.
- Li, L. Y. O., & Fu, Z. (2002). The school bus routing problem : A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 53(5), 552-558.
- Martínez, L. M., & Viegas, J. M. (2011). Design and Deployment of an Innovative School Bus Service in Lisbon. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 120-130.
- Mathew, T. V. (2014). Fuel Consumption and Emission Studies. *Transportation Systems Engineering*. Consulté le 02 juin 2016, tiré de http://nptel.ac.in/courses/105101008/downloads/cete_43.pdf
- Maurya, D. C., Zia, R., & Pradman, A. (2016). Anisotropic string cosmological model in Brans–Dicke theory of gravitation with time-dependent deceleration parameter. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 4(10), 617-622.
- Montoya-Torres, J. R., Franco, J. L., Isaza, S. N., Jiménez, F. H., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers and Industrial Engineering* 79, 115-129.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2003). *Guidance for Implementation of the AASHTO Strategic Highway Safety Plan*. Transportation research board Washington D.C. Consulté le 6 juin 2016, tiré de <https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=P8on18ixf34C&oi=fnd&pg=PP1&dq=Guidance+for+Implementation+of+the+AASHTO+Strategic+Highway+Safety+Plan&ots=Uxm7PCTELY&sig=MAg4s0t5PsEmEhYkgtnAuEpp1KM#v=onepage&q=Guidance%20for%20Implementation%20of%20the%20AASHTO%20Strategic%20Highway%20Safety%20Plan&f=false>

- Newton, R.M., & Thomas, W.H. (1969). Design of school bus routes by computer. *Socio-Economic. Planning Sciences* 3(1), 75-85.
- Ocotlán, D.-P., Ruiz-Vaniye, J. A., & -Zavala- Diaz, J C. (2011). School Bus Routing Problem Library-SBRPLIB. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 2(1), 23-26.
- Oder, G., Reibenschuh, M., Cus, F., & Potrc, I. (2010). Theoretical and Numerical Approach in Determining the Thermal and Stress Loads in Train Disc Brakes. *Engineering: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 54(5), 371-379.
- Osman, I.H. & Laporte, G. (1996). Metaheuristics : A bibliography. *Annals of Operational Research*, 63. 513-628.
- Pacheco, J., & Martí, R. (2006). Tabu search for a multi-objective routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 57(1), 29-37.
- Park, J., Kim, & B.I. (2010). The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research* 202, 311–319.
- Park, J., Tae, H., & Kim, B. I. (2012). A post-improvement procedure for the mixed load school bus routing problem. *European Journal of Operational Research*, 217(1), 204-213.
- Pelle, S. (2005). Géomatique la théorie des graphes. *École nationale des sciences géographiques. Marne la Vallée*.
- Rashidi, T., Hedayat, Z.-A., Mohammadian, A. (2009). School bus routing problem in large-scale networks. *Transportation Research Record*, 2137, 140-147.
- Riera-Ledesma, J, & Salazar-Gonzalez, J.J. (2006). Solving a school bus routing problem. In : Odysseus. *Workshop on freight transportation and logistics*, 285–8.

- Riera-Ledesma, J., & Salazar-González, J. J. (2012). Solving school bus routing using the multiple vehicle traveling purchaser. *Computers & Operations Research* 39, 391–404.
- Ripplinger, D. (2005). Rural school vehicle routing problem. *Transportation Research Record*, 105-110.
- Saka, A. A. (2000). Model for determining optimum bus stop spacing in urban areas. [Version électronique]. *Journal of Transportation Engineering*, 127(3). Consulté le 10 aout, tiré de [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2001\)127:3\(195\(](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:3(195)
- Schittekat, P., Kinable, P., Sörensen, K., Sevaux M., Spieksma, F., & Springael, J. (2013). A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection. *European Journal of Operational Research* 229(2), 518-528.
- Shin, K. S., Jeong, Y.-S., & Jeong, M. K. (2012). A two-leveled symbiotic evolutionary algorithm for clustering problems. *Applied Intelligence*, 36, 788-799.
- Shrestha, R. M., & Zolnik, E. J. (2013). Eliminating Bus Stops: Evaluating Changes in Operations, Emissions and Coverage. *Journal of public Transportation*, 16(2), 153-175.
- Spada, M., Bierlaire, M., & Liebling, Th.M. (2005). Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem. *Transportation Science* 39, 477– 490.
- Thangiah, S. R., & Nygard, K. E. (1992). School bus routing using genetic algorithms. *Proceedings of SPIE Digital Library*, 1707.
- Van Moffaert, K., Van Vreckem, B., Mihaylov, M., & Nowe, A. (2011). A learning approach to the school bus routing problem. *Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference*. Ixelles: Vrije Universiteit Brussel.
- Vérificateur général du Québec. (2011). *Rapport du Vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale pour l'année 2010-2011*. Consulté le 31 octobre 2016, tiré de http://www.vgq.gouv.qc.ca/fr/fr_publications/fr_rapport-annuel/fr_2010-2011-T1/fr_Rapport2010-2011-T1.pdf

- Vidal, T. (2015). Hybrid Metaheuristics for the Clustered Vehicle. *Computers & Operations Research*, 58, 87-99.
- Wang, C., Mu, D., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2015). A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows. *Computers and Industrial Engineering*, 83, 111-122.
- Wu, Q., & Hao, J.-K. (2012). An effective heuristic algorithm for sum coloring of graphs. *Computers and Operations Research*, 39, 1593-1600.
- Xu, R., & Wunsch II, D. C. (2008). Clustering. Consulté le 12 novembre 2016, tiré de https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=kYC3YCyl_tkC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Clustering+2008&ots=qid8CCai2D&sig=VqcUjPuiWszp44gWvggNaxkg_YI#v=onepage&q=Clustering%202008&f=false
- Ziari, H., Keymanesh, M. R., & Khabiri, M.M. (2007). Locating stations of public transportation vehicles for improving transit accessibility. *Transport*, 99-104.
- Zolnik, E. J., & Shrestha, R. M. (2013). Eliminating Bus Stops : Evaluating Changes in Operations, Emissions and Coverage. Public transportation. *Journal of Public Transportation*, 16(2), 153-175.

ANNEXE I

Le routage pour les arrêts obtenus par l'algorithme d'optimisation

➤ Route initiale

De la même façon, nous allons créer la matrice De / À et la matrice de rang, pour déduire la matrice des produits. (Voir les tableaux : 4.2, 4.3 et 4.4)

	X	Y	Ec	Ar1	Ar2	Ar4	Ar5	Ar8	Ar9
Ec	300	300	0	386	225	317	280	272	202
Ar1	654	145	386	0	570	505	183	574	440
Ar2	215	508	225	570	0	224	414	392	391
Ar4	422	593	317	505	224	0	322	568	519
Ar5	580	312	280	183	414	322	0	529	414
Ar8	80	140	272	574	392	568	529	0	137
Ar9	215	117	202	440	391	519	414	137	0

Tableau d'annexe 1 : La matrice De / À pour Les arrêts

	X	Y	Ec	Ar1	Ar2	Ar4	Ar5	Ar8	Ar9
Ec	4	4	m	4	3	4	3	5	4
Ar1	1	5	4	m	7	6	3	7	6
Ar2	5	2	3	7	m	3	4	6	5
Ar4	3	1	4	6	3	m	3	9	8
Ar5	2	3	3	3	4	3	m	8	7
Ar8	7	6	5	7	6	9	8	m	3
Ar9	5	7	4	6	5	8	7	3	m

Tableau d'annexe 2 : La matrice des rangs pour l'algorithme d'optimisation

	Ec	Ar1	Ar2	Ar4	Ar5	Ar8	Ar9
Ec	m	1546	674	1270	841	1360	807
Ar1	1546	m	3987	3027	548	4018	2639
Ar2	674	3987	m	671	1657	2352	1955
Ar4	1270	3027	671	m	967	5108	4152
Ar5	841	548	1657	967	m	4230	2897
Ar8	1360	4018	2352	5108	4230	m	411
Ar9	807	2639	1955	4152	2897	411	m

Tableau d'annexe 3 : La matrice des produits pour l'algorithme d'optimisation

Une fois les trois matrices sont calculées, on procède par la détermination de l'ordre de visite des arrêts. On commence par l'école et on se dirige vers l'arrêt dont la valeur

produite est la plus petite. La figure 2.1 illustre ce cheminement pour le cas de la méthode optimisée, la route trouvée est :

Ec Ar2 Ar4 Ar5 Ar1 Ar9 Ar8 Ec

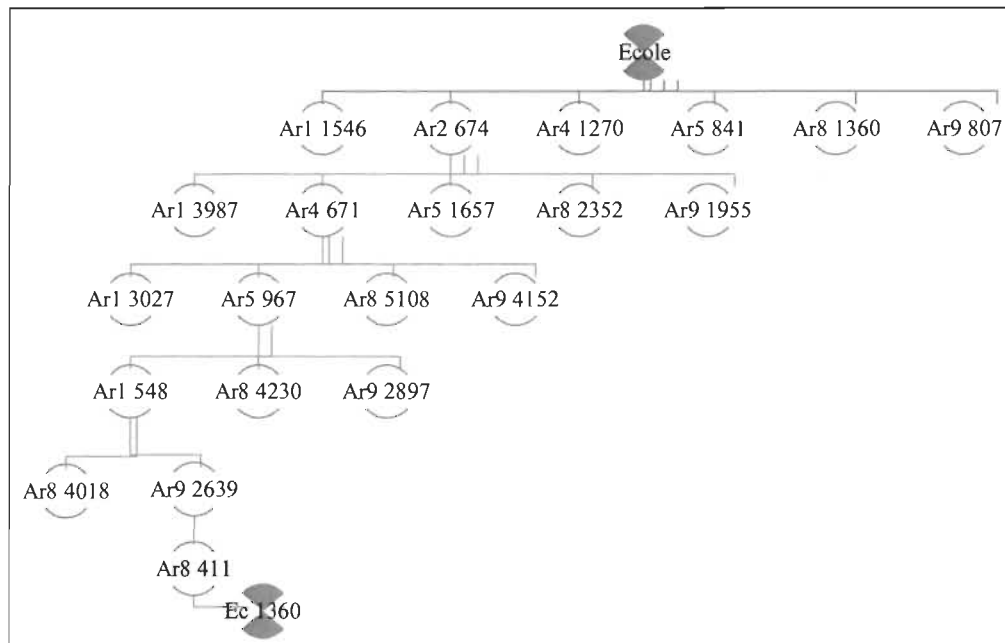


Figure d'annexe 4 : L'arborescence de la séquence du routage

Pour mieux visualiser cette route, la figure 3.16 montre l'ordre de visite de l'école pour finir à l'école.

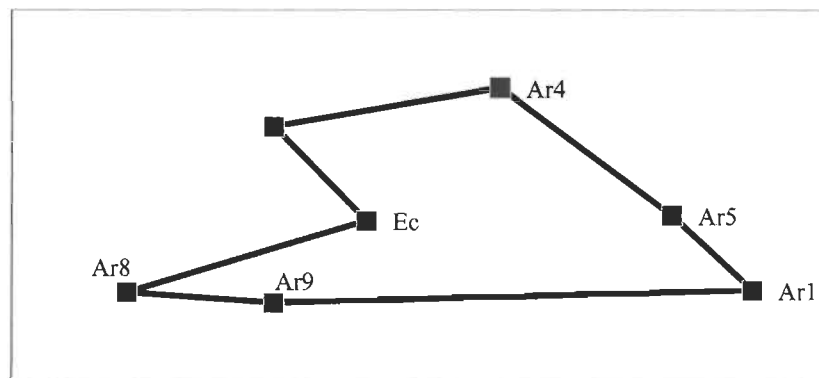


Figure d'annexe 5 : La route initiale d'après l'algorithme d'optimisation

➤ La phase d'amélioration

Ensuite la route subit une phase d'amélioration toujours par la recherche Tabou. Le tableau 3.21 montre les différentes itérations avec les inversions qui étaient nécessaires pour trouver la meilleure solution.

Pour cet exemple la phase d'amélioration n'a pas apporté une réduction de la distance par rapport à la route initiale. On garde alors la route initiale comme résultat final. L'instance 1 non inversée est donc conservée, pour une distance totale de 1802 m.

Itération.	Route initiale	Top 4 des inversions	Distance	Amélioration	Décision	Tabou
1	Ec, Ar2, Ar4, Ar5, Ar1, Ar9, Ar8, Ec T=1802	Ar9Ar8	1866	-64	Ok	
		Ar5 Ar1	1958	-156		
		Ar2 Ar4	1987	-185		
		Ar4 Ar1	2227	-425		
2	Ec, Ar2, Ar4, Ar5, Ar1, Ar8, Ar9, Ec T=1866	Ar8 Ar9	1802	64	Ok	
		Ar5 Ar1	2003	-137		
		Ar2 Ar4	2051	-185		Ar8, Ar1
		Ar4 Ar1	2206	-339		Ec, Ar9
3	Ec, Ar2, Ar4, Ar5, Ar1, Ar9, Ar8, Ec T=1802	Ar9Ar8	1866	-64	Tabou	Ar8, Ar1
		Ar5 Ar1	1958	-156	Ok	Ec, Ar9
		Ar2 Ar4	1987	-185		Ar1, Ar9
		Ar4 Ar1	2227	-425		Ec, Ar8
4	Ec, Ar2, Ar4, Ar1, Ar5, Ar9, Ar8, Ec T=1958	Ar1 Ar5	1802	137	Tabou	Ar1, Ar9
		Ar9 Ar8	2003	45	Tabou	Ec, Ar8
		Ar2 Ar4	2116	-158	Ok	Ar9, Ar5
		Ar4 Ar5	2254	-229		Ar1 Ar4
5	Ec, Ar4, Ar2, Ar1, Ar5, Ar9, Ar8, Ec T=2116	Ar4 Ar2	1958	158	Ok	Ar9, Ar5
		Ar1 Ar5	1987	110		Ar1 Ar4
		Ar9 Ar8	2161	45		Ec Ar4
		Ar2 Ar5	2192	38		Ar2 Ar1
6	Ec, Ar2, Ar4, Ar1, Ar5, Ar9, Ar8, Ec T=1958	Ar1 Ar5	1802	137	Ok	Ec Ar4
		Ar9 Ar8	2003	45		Ar2 Ar1
		Ar2 Ar4	2116	-158		Ec, Ar2
		Ar4 Ar5	2254	-229		Ar4 Ar1
7	Ec, Ar2, Ar4, Ar5, Ar1, Ar9, Ar8, Ec T=1802	Ar9 Ar8	1866	64	Ok	Ec, Ar2
		Ar5 Ar1	1958	-137		Ar4 Ar1
		Ar2 Ar4	1987	-185		Ar4 Ar5
		Ar4 Ar1	2227	-339		Ar1 Ar9
8	Ec, Ar4, Ar2, Ar5, Ar1, Ar8, Ar9, Ec T=1866	Ar8 Ar9	1802	-64	Ok	Ar4 Ar5
		Ar5 Ar1	2003	-156		Ar1 Ar9
		Ar2 Ar4	2051	-185		Ar1 Ar8
		Ar4 Ar1	2206	-425		Ec, Ar9

Figure d'annexe 6 : Les itérations de la recherche tabou pour la méthode optimisée

ANNEXE II

La liste complète des adresses et la répartition de l'instance de validation

(SSSS-s20-U100-c25-w10)

Tableau d'annexe 7 : Les coordonnées de l'instance de validation

	X	Y
École	1250	1250
Arrêt 1	1174.45	306.475
Arrêt 2	857.575	1157.625
Arrêt 3	375.3	363.925
Arrêt 4	1357.6	1724.1
Arrêt 5	904.475	608.225
Arrêt 6	1293.975	364.875
Arrêt 7	591.45	2227.8
Arrêt 8	480.925	873.125
Arrêt 9	1339.975	773.075
Arrêt 10	1599.15	2006.75
Arrêt 11	2158	1456.15
Arrêt 12	1383.7	359.1
Arrêt 13	1225.7	1573.05
Arrêt 14	1343.45	2154.55
Arrêt 15	1206.075	1417.925
Arrêt 16	1921.4	1692.625
Arrêt 17	1110.325	1522.35
Arrêt 18	2218.125	798.4
Arrêt 19	734.825	1610.5
Arrêt 20	1374.3	1162.925
Élève 1	1154.25	324.375
Élève 2	1144.4	256.125
Élève 3	1124.6	272.525
Élève 4	1214.175	182.35
Élève 5	1189.15	130.1
Élève 6	805.675	1171.2
Élève 7	846.325	1153.075

Élève 8	947.725	986.625
Élève 9	1063.625	1195.7
Élève 10	870.8	1139.2
Élève 11	459.925	446
Élève 12	216.225	294.75
Élève 13	455.4	209.425
Élève 14	356.9	349.725
Élève 15	259.125	307.475
Élève 16	1484.575	1582.525
Élève 17	1364.425	1713.925
Élève 18	1349.3	1731.625
Élève 19	1353.125	1674.9
Élève 20	1463.775	1939.15
Élève 21	896.1	501.425
Élève 22	844.625	522.55
Élève 23	923.225	609.7
Élève 24	917.125	584.2
Élève 25	904.025	610.75
Élève 26	1154.675	341.55
Élève 27	1388.975	409.75
Élève 28	1300.675	139.05
Élève 29	1342.85	278.025
Élève 30	1144.15	165.8
Élève 31	363.6	2164.65
Élève 32	434.175	2269.025
Élève 33	536.775	2244.95
Élève 34	553.975	2225
Élève 35	566.325	2341.5
Élève 36	612.25	971.45

Élève 37	563.55	747.025
Élève 38	472.225	833.35
Élève 39	675.65	905.95
Élève 40	497.4	944.275
Élève 41	1378.225	865.525
Élève 42	1272.975	826.35
Élève 43	1356.45	755.675
Élève 44	1360.875	684.875
Élève 45	1180.2	669.475
Élève 46	1427	2021.3
Élève 47	1593.875	2010.225
Élève 48	1840.325	2033.85
Élève 49	1546.275	1983.975
Élève 50	1556.775	2237.25
Élève 51	2051.375	1527.55
Élève 52	2049.525	1467.825
Élève 53	1962.45	1511.1
Élève 54	1990.8	1565.4
Élève 55	1960.325	1503.45
Élève 56	1538.875	493.875
Élève 57	1425.575	385.85
Élève 58	1441.575	583.775
Élève 59	1392.725	354.875
Élève 60	1376.25	299.7
Élève 61	1068.75	1514.05
Élève 62	1098.925	1642.2
Élève 63	1278.25	1619.3
Élève 64	1228.725	1551.05
Élève 65	1344.025	1489.15

Élève 66	1316.55	1925.325
Élève 67	1506.7	2129.125
Élève 68	1155.175	2168.225
Élève 69	1335.7	2168.6
Élève 70	1432.15	2206.3
Élève 71	1372.375	1384.475
Élève 72	1088.15	1599.25
Élève 73	1194.125	1408.925
Élève 74	1147.425	1477.025
Élève 75	1290.475	1353.65
Élève 76	1746.6	1608.35
Élève 77	1978.425	1550.325
Élève 78	1712.7	1722.175
Élève 79	1884.975	1700.65
Élève 80	1887.925	1644.175
Élève 81	1204.875	1426.425
Élève 82	1116.05	1514.5
Élève 83	1092.625	1525.75
Élève 84	1057.1	1582.85
Élève 85	1250.425	1460.875
Élève 86	2224.075	806.25
Élève 87	2270	797.15
Élève 88	2197.475	689.175
Élève 89	2181.125	599.175
Élève 90	2145.625	678.1
Élève 91	674.6	1615.975
Élève 92	763.65	1610.9
Élève 93	697.7	1450.175
Élève 94	638.025	1562.875
Élève 95	730.375	1537.85

Élève 96	1214.925	1331.025
Élève 97	1443.575	951.275
Élève 98	1464.925	1303.1
Élève 99	1208.975	1104.05
Élève 100	1582.625	1183.15



Figure d'annexe 8 : La répartition de l'instance de validation

ANNEXE III

Phase de sélection des arrêts avec les deux méthodes avec plusieurs limites maximales
de marche pour l'instance de validation



Figure d'annexe 8 : Répartition de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w250 avec 18 arrêts

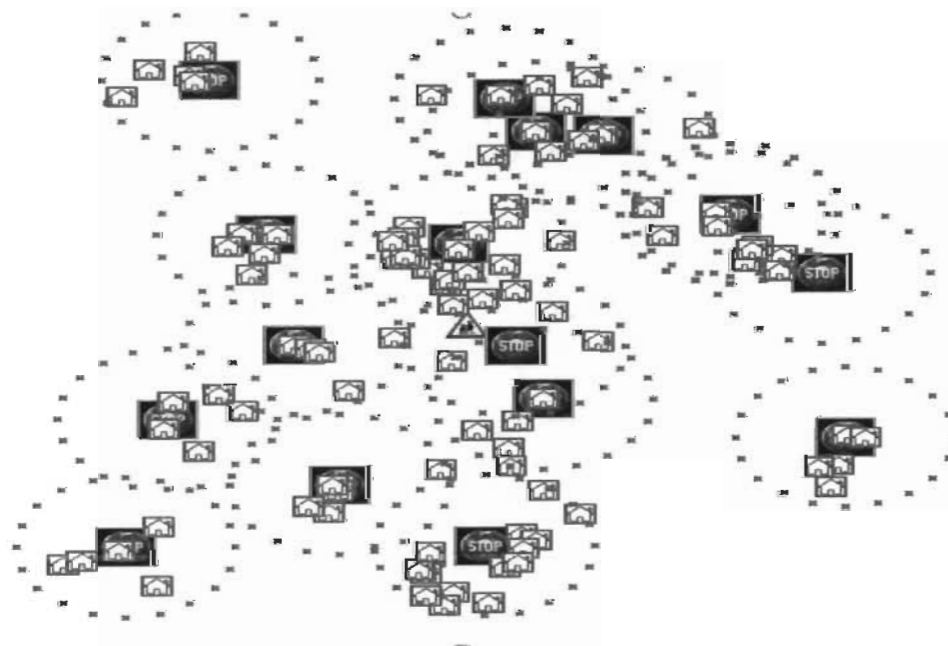


Figure d'annexe 10 : Répartition de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w280 avec 16 arrêts

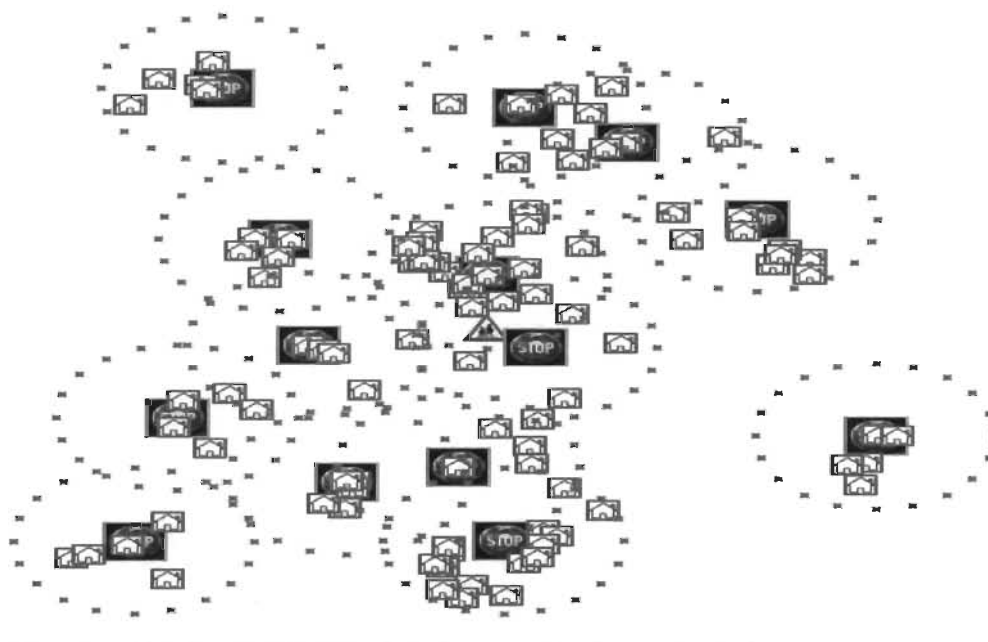


Figure d'annexe 11 : Répartition de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w300 avec 14 arrêts

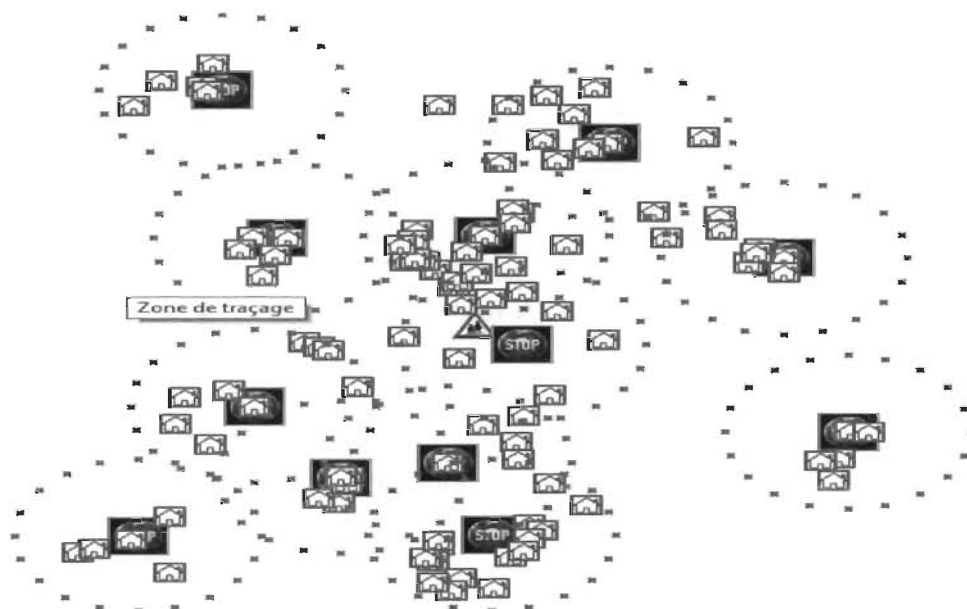


Figure d'annexe 12 : Répartition de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w320 avec 12 arrêts

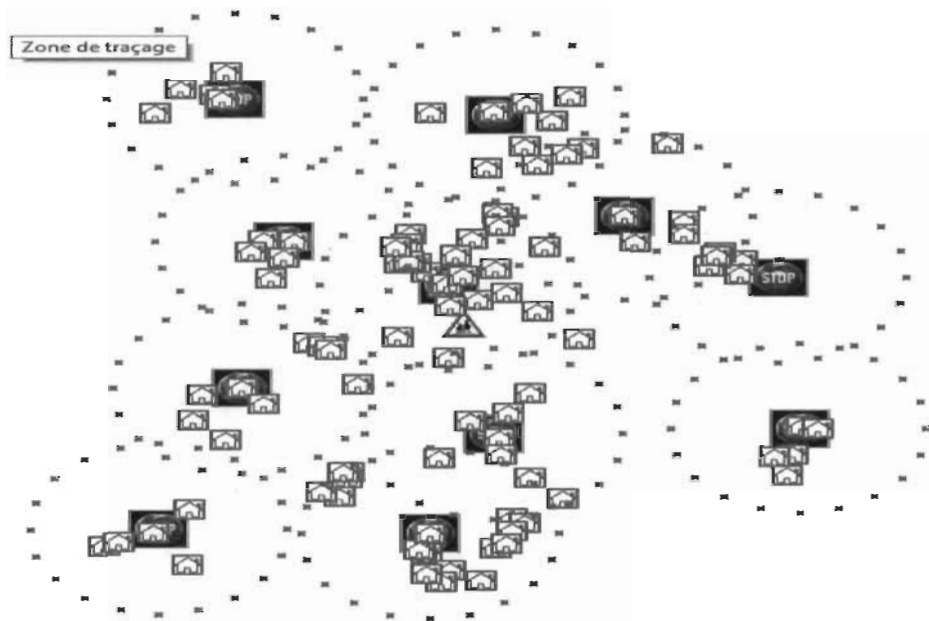


Figure d'annexe 13 : Répartition de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w370 avec 11 arrêts

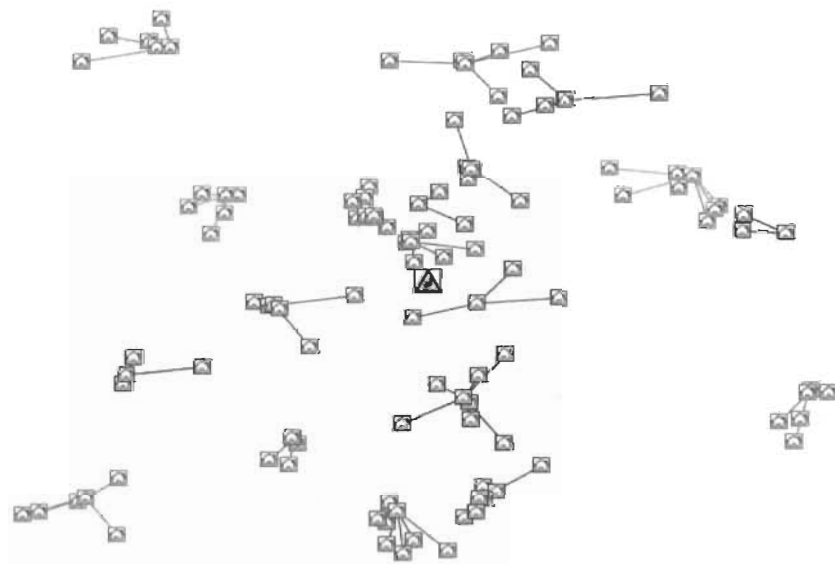


Figure d'annexe 14 : Répartition de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w250 avec 19 arrêts avec la méthode actuelle

ANNEXE IV

La phase de routage pour l'instance SSSS-s20-U100-c100 selon les différentes limites
maximales de marche

Itér.	Route initiale																			Distance	Inversion		Liste des tabous								
1	0	13	4	66	10	16	73	18	20	9	5	2	8	3	49	12	19	7	14	0	10486										
2	0	13	14	66	10	16	73	18	20	9	5	2	8	3	49	12	19	7	4	0	10469	4	14	13	14	14	66	7	4	4	0
3	0	4	14	66	10	16	73	18	20	9	5	2	8	3	49	12	19	7	13	0	10301	13	4	4	14	7	13				
4	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	5	2	8	3	49	12	19	7	13	0	10298	14	66	4	66	14	10				
5	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	5	3	8	2	49	12	19	7	13	0	10363	2	3	5	3	2	49				
6	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	5	3	8	12	49	2	19	7	13	0	9989	2	12	8	12	2	19				
7	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	5	8	3	12	49	2	19	7	13	0	9875	3	8	5	8	3	12				
8	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	5	8	3	49	12	2	19	7	13	0	9790	12	49	3	49	12	2				
9	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	3	8	5	49	12	2	19	7	13	0	9950	5	3	9	3	5	49				
10	0	4	14	66	10	16	73	18	20	9	3	8	5	49	12	2	19	7	13	0	9953	66	14	4	14	66	10				
11	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	3	8	5	49	12	2	19	7	13	0	9950	14	66	4	66	14	10				
12	0	4	66	14	10	16	73	18	20	9	8	3	5	49	12	2	19	7	13	0	9850	3	8	9	8	3	5				
13	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	49	12	9	19	7	13	0	9606	9	2	20	2	2	8	12	9	9	19
14	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	12	49	9	19	7	13	0	9677	49	12	5	12	49	9				
15	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	12	49	9	13	7	19	0	9756	19	13	9	13	19	0				
16	0	4	14	66	10	16	73	18	20	2	8	3	5	12	49	9	13	7	19	0	9759	66	14	4	14	66	10				
17	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	12	49	9	13	7	19	0	9756	14	66	4	66	14	10				
18	0	4	66	14	10	16	73	18	9	2	8	3	5	12	49	20	13	7	19	0	9834	20	9	18	9	9	2	49	20	20	13
19	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	12	49	9	13	7	19	0	9756	9	20	18	20	20	2	49	9	9	13
20	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	12	49	9	19	7	13	0	9677	13	19	9	19	13	0				
21	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	49	12	9	19	7	13	0	9606	12	49	5	49	12	9				

Tableau d'annexe 15 : Les itérations de la recherche tabou pour le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w250 avec 18 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

Itér.	Route initiale																	Distanc e	Inversio n	Liste des tabous									
1	0	13	19	26	8	3	4	6	11	2	1	1	1	6	1	7	1	0											
2	0	13	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	2	0	8666	20	18	11	1	1	11	7	2	2	0
3	0	13	20	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8522	19	20	13	2	2	26	7	1	1	0
4	0	13	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	2	0	8666	20	19	13	1	1	26	7	2	2	0
5	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	13	20	20	1	7	13				
6	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	1	6	7	1	0	8771	66	14	10	1	6	7				
7	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	14	66	10	6	1	7				
8	0	20	19	26	8	3	6	4	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8879	43	6	3	6	4	11				
9	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	6	43	3	4	6	11				
10	0	20	13	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8363	19	13	20	1	1	26	7	1	1	0
11	0	13	20	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8522	20	13	0	1	2	26				
12	0	13	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	2	0	8666	20	19	13	1	1	26	7	2	2	0
13	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	13	20	20	1	7	13				
14	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	1	6	7	1	0	8771	66	14	10	1	6	7				
15	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	14	66	10	6	1	7				
16	0	20	13	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8363	19	13	20	1	1	26	7	1	1	0
17	0	13	20	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8522	20	13	0	1	2	26				
18	0	13	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	2	0	8666	20	19	13	1	1	26	7	2	2	0
19	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	13	20	20	1	7	13				
20	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	1	6	7	1	0	8771	66	14	10	1	6	7				
21	0	20	19	26	8	3	4	6	11	1	1	1	1	6	1	7	1	0	8544	14	66	10	6	1	7				

Tableau d'annexe 16 : Les itérations de la recherche tabou pour le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w280 avec 16 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

Itér.	Route initiale																Distance	Inversion		Liste des tabous			
1	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0							
2	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	3	8	26	0	8613	26	3	19	3	26	0
3	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8554	3	26	19	26	3	0
4	0	105	20	5	65	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8617	65	5	20	5	65	6
5	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8554	5	65	20	65	5	6
6	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	3	8	0	8639	8	3	26	3	8	0
7	0	20	105	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	3	8	0	8845	105	20	0	20	105	65
8	0	20	105	6	5	65	18	16	10	14	7	19	26	3	8	0	9172	65	6	105	6	65	18
9	0	105	20	6	5	65	18	16	10	14	7	19	26	3	8	0	8936	20	105	0	105	20	6
10	0	105	20	6	5	65	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8851	3	8	26	8	3	0
11	0	105	20	5	6	65	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8819	6	5	20	5	6	65
12	0	105	20	5	65	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8617	6	65	5	65	6	18
13	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8554	5	65	20	65	5	6
14	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	3	8	26	0	8613	26	3	19	3	26	0
15	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	8	3	26	0	8569	3	8	19	8	3	26
16	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	3	8	0	8639	8	26	19	26	8	0
17	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8554	3	8	26	8	3	0
18	0	105	20	5	65	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8617	65	5	20	5	65	6
19	0	20	105	5	65	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8751	105	20	0	20	105	5
20	0	20	105	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8759	5	65	105	65	5	6
21	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0	8554	20	105	0	105	20	65

Tableau d'annexe 17 : Les itérations de la recherche tabou pour le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w300 avec 14 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

Itér.	Route initiale														Distance	Inversion		Liste des tabous									
1	0	83	10	71	20	65	5	59	19	7	3	6	18	0													
2	0	83	10	71	18	65	5	59	19	7	3	6	20	0	9073,8	20	18	71	18	18	65	6	20	20	0		
3	0	83	10	71	18	6	5	59	19	7	3	65	20	0	8896	65	6	18	6	6	5	3	65	65	20		
4	0	83	10	71	18	6	3	59	19	7	5	65	20	0	8794,2	5	3	6	3	3	59	7	5	5	65		
5	0	83	10	71	18	6	3	7	19	59	5	65	20	0	8776,9	59	7	3	7	59	5						
6	0	83	10	71	18	6	3	19	7	59	5	65	20	0	8815,4	7	19	3	19	7	59						
7	0	83	10	71	18	6	59	19	7	3	5	65	20	0	8887,2	3	59	6	59	59	19	7	3	3	5		
8	0	83	10	71	18	6	65	19	7	3	5	59	20	0	9032	59	65	6	65	65	19	5	59	59	20		
9	0	83	10	71	18	6	65	19	7	5	3	59	20	0	9049,3	3	5	7	5	3	59						
10	0	83	10	71	18	6	65	7	19	5	3	59	20	0	9041,1	19	7	65	7	19	5						
11	0	83	10	71	18	6	19	7	65	5	3	59	20	0	9347,2	65	19	6	19	65	5						
12	0	83	10	71	18	20	19	7	65	5	3	59	6	0	9472,5	6	20	18	20	20	19	59	6	6	0		
13	0	83	10	71	18	20	19	7	59	5	3	65	6	0	8969	65	59	7	59	59	5	3	65	65	6		
14	0	83	10	71	18	20	19	7	59	5	3	6	65	0	8725,2	65	6	3	6	65	0						
15	0	83	10	71	18	20	19	7	59	3	5	6	65	0	8510	5	3	59	3	5	6						
16	0	83	10	71	18	20	7	19	59	3	5	6	65	0	8433,6	19	7	20	7	19	59						
17	0	20	10	71	18	83	7	19	59	3	5	6	65	0	8509,8	83	20	0	20	20	10	18	83	83	7		
18	0	20	18	71	10	83	7	19	59	3	5	6	65	0	7810,9	10	18	20	18	10	83						
19	0	20	18	71	10	83	7	19	59	3	5	65	6	0	7935,6	6	65	5	65	6	0						
20	0	20	18	71	10	83	7	19	59	3	6	65	5	0	8114,1	5	6	3	6	5	0						
21	0	20	18	71	10	83	7	19	59	3	6	5	65	0	8104	65	5	6	5	65	0						

Tableau d'annexe 18 : Les itérations de la recherche tabou pour le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w320 avec 12 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

Itér.	Route initiale													Distance	Inversion		Liste des tabous									
1	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	3	56	0													
2	0	15	19	7	14	98	11	18	9	56	3	46	0	7798	46	56	9	56	46	0						
3	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	3	56	0	7296	56	46	9	46	56	0						
4	0	15	19	7	14	98	11	18	46	9	3	56	0	7843	9	46	18	46	9	3						
5	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	3	56	0	7296	46	9	18	9	46	3						
6	0	15	7	19	14	98	11	18	9	46	3	56	0	7864	19	7	15	7	19	14						
7	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	3	56	0	7296	7	19	15	19	7	14						
8	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	56	3	0	7896	3	56	46	56	3	0						
9	0	15	14	7	19	98	11	18	9	46	56	3	0	8552	19	14	15	14	19	98						
10	0	98	14	7	19	15	11	18	9	46	56	3	0	8818	15	98	0	98	98	14	19	15	15	11		
11	0	98	14	7	19	15	11	18	9	46	3	56	0	8217	56	3	46	3	56	0						
12	0	98	14	7	19	15	18	11	9	46	3	56	0	8638	11	18	15	18	11	9						
13	0	98	14	7	19	15	9	11	18	46	3	56	0	8798	18	9	15	9	18	46						
14	0	9	14	7	19	15	98	11	18	46	3	56	0	8821	98	9	0	9	9	14	15	98	98	11		
15	0	9	19	7	14	15	98	11	18	46	3	56	0	8712	14	19	9	19	14	15						
16	0	56	19	7	14	15	98	11	18	46	3	9	0	8726	9	56	56	19	3	9						
17	0	56	19	7	14	15	98	11	18	9	3	46	0	8875	46	9	18	9	46	0						
18	0	56	19	7	14	15	98	11	18	9	46	3	0	8628	3	46	9	46	3	0						
19	0	56	19	7	15	14	98	11	18	9	46	3	0	8867	14	15	7	15	14	98						
20	0	56	19	7	14	15	98	11	18	9	46	3	0	8628	15	14	7	14	15	98						
21	0	56	19	7	14	15	98	11	18	3	46	9	0	8883	9	3	18	3	9	0						

Tableau d'annexe 19 : Les itérations de la recherche tabou pour le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w370 avec 111 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

Itér.	Route initiale																				Distance	Inversion		Liste des tabous								
1	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	2	8	3	19	7	0											
2	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10099	2	3	5	3	2	19				
3	0	9	12	1	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10126	1	9	0	9	1	20				
4	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10099	9	1	0	1	9	20				
5	0	12	1	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10132	1	12	0	12	1	9				
6	0	5	1	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	12	3	8	2	19	7	0	10190	12	5	0	5	5	1	18	12	12	3
7	0	5	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	1	3	8	2	19	7	0	10250	1	12	5	12	12	9	18	1	1	3
8	0	5	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	1	3	8	2	7	19	0	10334	19	7	2	7	19	0				
9	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	7	19	0	10182	5	1	0	1	1	12	18	5	5	3
10	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10099	7	19	2	19	7	0				
11	0	9	12	1	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10126	1	9	0	9	1	20				
12	0	9	1	12	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10129	12	1	9	1	12	20				
13	0	12	1	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10132	9	12	0	12	9	20				
14	0	5	1	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	12	3	8	2	19	7	0	10190	12	5	0	5	5	1	18	12	12	3
15	0	5	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	1	3	8	2	19	7	0	10250	1	12	5	12	12	9	18	1	1	3
16	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10099	5	1	0	1	1	12	18	5	5	3
17	0	9	12	1	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10126	1	9	0	9	1	20				
18	0	9	1	12	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10129	12	1	9	1	12	20				
19	0	12	1	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10132	9	12	0	12	9	20				
20	0	5	1	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	12	3	8	2	19	7	0	10190	12	5	0	5	5	1	18	12	12	3
21	0	5	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	1	3	8	2	19	7	0	10250	1	12	5	12	12	9	18	1	1	3

Tableau d'annexe 20 : Les itérations de la recherche tabou pour le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w250 avec 18 arrêts avec la méthode actuelle

istance de marche	Nbe des arrêts	Les arrêts																						Distance totale	Distance Marchée
250	18	0	13	49	73	66	9	2	3	5	7	8	18	19	20	10	4	12	14	16	0		20293	11548	
	18	0	13	4	66	10	16	73	18	20	9	5	2	8	3	49	12	19	7	14	0		10485		
	18	0	4	66	14	10	16	73	18	20	2	8	3	5	49	12	9	19	7	13	0		9606		
280	16	0	13	6	16	66	117	26	43	3	7	18	19	8	10	11	14	20	0				17621	13782	
	16	0	13	19	26	8	3	43	6	117	20	11	16	10	66	14	7	18	0				10035		
	16	0	20	13	26	8	3	43	6	117	18	11	16	10	66	14	7	19	0				8362		
300	14	0	105	6	14	16	65	26	3	7	18	19	8	20	5	10	0						17216	14381	
	14	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0						8554		
	14	0	105	20	65	5	6	18	16	10	14	7	19	26	8	3	0						8554		
320	12	0	83	6	10	59	71	65	3	7	18	19	20	5	0								16294	16187	
	12	0	83	10	71	20	65	5	59	19	7	3	6	18	0								9714		
	12	0	20	18	71	10	83	7	19	59	3	5	6	65	0								7810		
370	11	0	15	46	98	56	9	14	3	7	18	19	11	0									16339	17668	
	11	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	3	56	0									7295		
	11	0	15	19	7	14	98	11	18	9	46	3	56	0									7295		
DE BASE	19	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	0	21035	10618	
	19	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	2	8	3	19	7	0	10895		
	19	0	1	12	9	20	15	17	13	4	14	10	16	11	18	5	3	8	2	19	7	0	10099		

Tableau d'annexe 21 : Tableau récapitulatif du routage en fonction de la distance de marche et la méthode de sélection

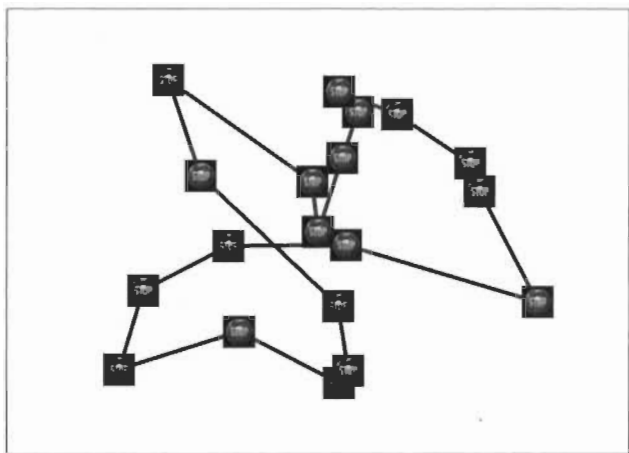


Figure d'annexe 22 : Le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w250 avec 18 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

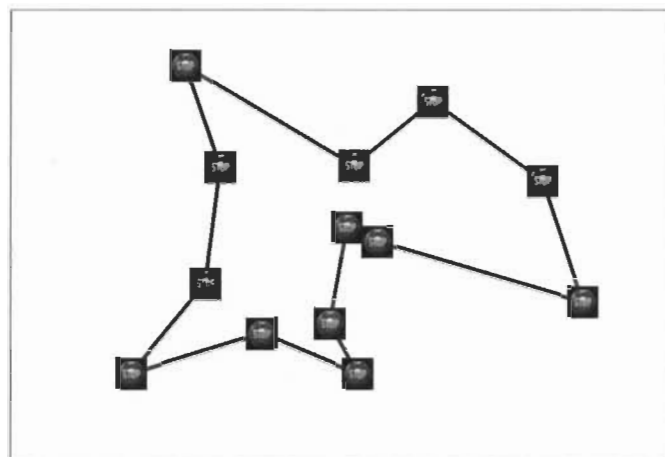


Figure d'annexe 23 : Le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w320 avec 12 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

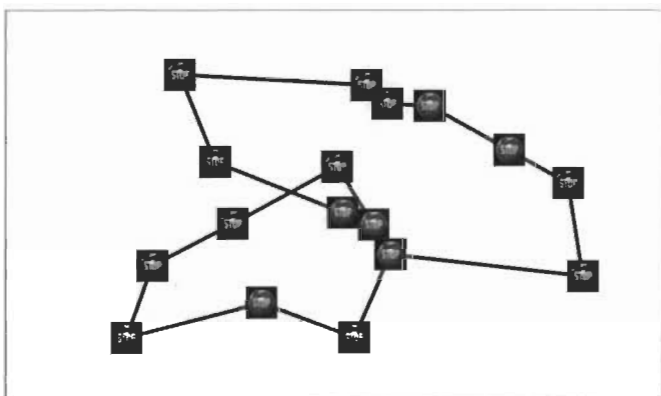


Figure d'annexe 24 : Le routage de l'instance SSSS-s16-U100-c100-w280 avec 16 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

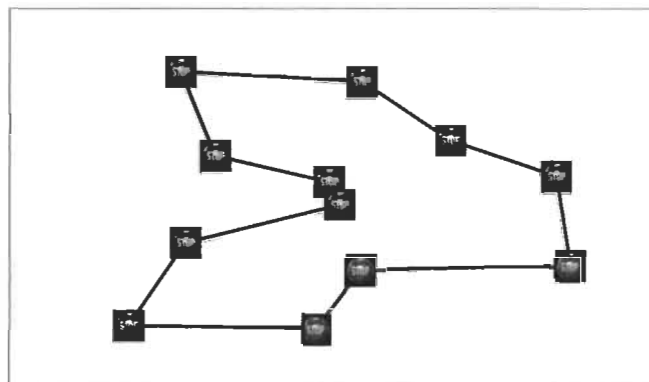


Figure d'annexe 25 : Le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w370 avec 11 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

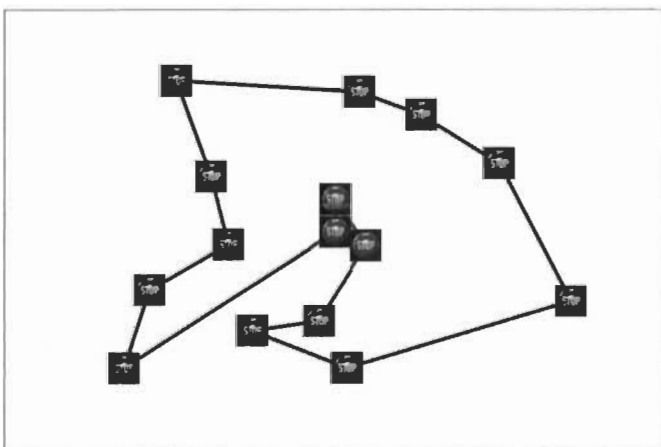


Figure d'annexe 26 : Le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w300 avec 14 arrêts avec l'algorithme d'optimisation

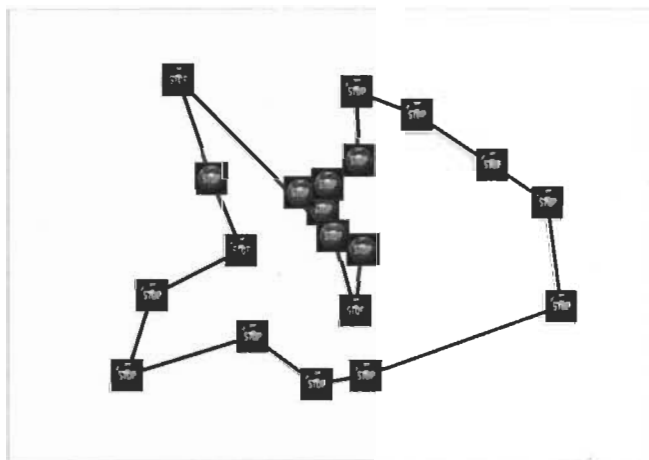


Figure d'annexe 27 : Le routage de l'instance SSSS-s20-U100-c100-w250 avec 19 arrêts avec la méthode actuelle

ANNEXE V

Les programmes utilisés pour la résolution de ce SBRP

```

Sub effacer_mat_dea()

Dim i, j, k, l As Integer

Dim cel, cel2, CEL1, cel3 As Range

k = Sheets("nat").Range("c65555").End(xlUp).Row

Set cel = Sheets("nat").Range("a1")

Range(cel.Offset(0, 1), cel.Offset(k + 2, k + 2)).Select

Selection.ClearContents

Range("A17").Select

End Sub

Sub rempli_mat_con()

Dim i, j, k, l As Integer

Dim cel, cel2, CEL1, cel3 As Range

k = Sheets("coord").Range("a65555").End(xlUp).Row

l = Sheets("nat_con").Range("b1")

Set cel = Sheets("nat").Range("a1")

Set CEL1 = Sheets("nat_con").Range("a1")

For i = 1 To k

CEL1.Offset(i + 1, 1) = i - 1

CEL1.Offset(1, i + 1) = i - 1

Next i

Sheets("nat_con").Select

```

```
Application.Union(Range(CEL1.Offset(1, 1), CEL1.Offset(k + 1, 1)),  
Range(CEL1.Offset(1, 1), CEL1.Offset(1, k + 1))).Select
```

```
Selection.Font.Bold = True
```

```
With Selection
```

```
.HorizontalAlignment = xlCenter
```

```
.VerticalAlignment = xlCenter
```

```
.WrapText = False
```

```
.Orientation = 0
```

```
.AddIndent = False
```

```
.IndentLevel = 0
```

```
.ShrinkToFit = False
```

```
.ReadingOrder = xlContext
```

```
.MergeCells = False
```

```
End With
```

```
With Selection.Font
```

```
.Name = "Times New Roman"
```

```
.Size = 16
```

```
.Strikethrough = False
```

```
.Superscript = False
```

```
.Subscript = False
```

```
.OutlineFont = False
```

```
.Shadow = False
```

```

.Underline = xlUnderlineStyleNone

.TintAndShade = 0

.ThemeFont = xlThemeFontNone

End With

For i = 1 To k

For j = 1 To k

If cel.Offset(j, i + 1) < 1 Then CEL1.Offset(j + 1, i + 1) = 1 Else CEL1.Offset(j + 1, i + 1)
= 0

Next j

Next i

End Sub

Sub effacer_mat_con()

Dim i, j, k, l As Integer

Dim cel, cel2, CEL1, cel3 As Range

k = Sheets("nat_con").Range("c65555").End(xlUp).Row

l = Sheets("nat_con").Range("b1")

Set CEL1 = Sheets("nat_con").Range("a1")

Range(CEL1.Offset(1, 1), CEL1.Offset(k + 2, k + 2)).Select

Selection.ClearContents

Range("A17").Select

End Sub

Sub affichage_visualiser()

```

```

Dim i, j, k, l As Integer

Dim cel2, CEL1, cel3, cel4 As Range

k = Sheets("visualiser").Range("a65555").End(xlUp).Row
l = Sheets("visualiser").Range("j65555").End(xlUp).Row

Set CEL1 = Sheets("visualiser").Range("j2")

Set cel2 = Sheets("visualiser").Range("d1")

Set cel3 = Sheets("visualiser").Range("a1")

Set cel4 = Sheets("visualiser").Range("h3")

For i = 0 To k - 1

For j = 0 To l - 1

If CEL1.Offset(j, 0) = cel3.Offset(i + 1, 0) Then

CEL1.Offset(j, 1) = cel3.Offset(i + 1, 1)

CEL1.Offset(j, 2) = cel3.Offset(i + 1, 2)

End If

Next

Next

For i = 0 To l - 2

For j = 1 To 20

cel2.Offset((i * 20) + j, 1) = (cel4.Offset(-2, 0) * cel4.Offset(j - 1, 0)) + CEL1.Offset(i, 1)

cel2.Offset((i * 20) + j, 2) = (cel4.Offset(-2, 0) * cel4.Offset(j - 1, 1)) + CEL1.Offset(i, 2)

Next

Next

```

```

End Sub

Sub affichage_selection_de_base()

Dim i, j, k, l, V1, V2, V3 As Integer

Dim cel2, CEL1, cel3, cel4 As Range

k = Sheets("de_base").Range("a65555").End(xlUp).Row


Set CEL1 = Sheets("de_base").Range("e1")

Set cel2 = Sheets("nat").Range("b1")

'Set Cel3 = Sheets("visualiser").Range("a1")

'Set cel4 = Sheets("visualiser").Range("h3")

For i = 22 To k

l = 10 ^ 10

For j = 2 To 21

If cel2.Offset(i, j) < l Then

l = cel2.Offset(i, j)

V1 = j

End If

Next

CEL1.Offset(0, i - 14) = cel2.Offset(i, 0)

CEL1.Offset(1, i - 14) = V1 - 1

Next

V2 = Sheets("de_base").Range("k65555").End(xlUp).Row

```

```

For i = 0 To k - 1

For j = 0 To V2 - 1

If CEL1.Offset(j + 3, 6) = CEL1.Offset(i + 1, -4) Then

CEL1.Offset(j + 3, 7) = CEL1.Offset(i + 1, -3)

CEL1.Offset(j + 3, 8) = CEL1.Offset(i + 1, -2)

End If

Next

Next

End Sub

Sub ensemble_dominant()

'Remplir la matrice de connexion*****

'*****

Dim i, j, g, k, l As Integer

Dim cel2, CEL1, cel3 As Range

k = Sheets("coord").Range("a65555").End(xlUp).Row

'l = Sheets("nat_con").Range("b1")

For g = 1 To 1

Set cel2 = Sheets("nat").Range("a1")

Set CEL1 = Sheets("nat_con").Range("a1")

Set cel3 = Sheets("lat_con").Range("a1")

Set cel4 = Sheets("visualiser").Range("j2")

l = CEL1.Offset(0, 1) 'la distance de marche maximale

```



```

'*****Effacer la matrice*****

'*****

Sheets("nat_con").Select

Range(CEL1.Offset(1, 1), CEL1.Offset(k + 2, k + 2)).Select

Selection.ClearContents

Range("A17").Select

'*****

For i = 1 To k

CEL1.Offset(i + 1, 1) = i - 1

CEL1.Offset(1, i + 1) = i - 1

Next i

Sheets("nat_con").Select

Application.Union(Range(CEL1.Offset(1, 1), CEL1.Offset(k + 1, 1)),
Range(CEL1.Offset(1, 1), CEL1.Offset(1, k + 1))).Select

Selection.Font.Bold = True

With Selection

.HorizontalAlignment = xlCenter

.VerticalAlignment = xlCenter

.WrapText = False

.Orientation = 0

.AddIndent = False

.IndentLevel = 0

```

```

.ShrinkToFit = False

.ReadingOrder = xlContext

.MergeCells = False

End With

With Selection.Font

.Name = "Times New Roman"

.Size = 16

.Strikethrough = False

.Superscript = False

.Subscript = False

.OutlineFont = False

.Shadow = False

.Underline = xlUnderlineStyleNone

.TintAndShade = 0

.ThemeFont = xlThemeFontNone

End With

For i = 1 To k

For j = 1 To k

If cel2.Offset(j, i + 1) < 1 * g Then CEL1.Offset(j + 1, i + 1) = 1 Else CEL1.Offset(j + 1, i
+ 1) = 0

Next j

```

Next i

```
*****
*****
```

```
*****
*****
```

Dim iteration As Integer

Dim A, B, c, D, E, f, h, Q, r, M, s, t, u, v, w, aa, bb As Integer

Dim cel As Range

t = (Sheets("nat_con").Range("b65555").End(xlUp).Row) - 2

Dim Dis(), z(), x(), y(), p(), mat(), con() As Integer

Set cel = Sheets("nat_con").Range("c3") 'On affecte la cellule "A1" à la variable Cel

iteration = 1

Range(cel.Offset(-2, 4), cel.Offset(-2, t + 2)).Select

Selection.ClearContents

Range(cel.Offset(t, -2), cel.Offset(t, t + 2)).Select

Selection.ClearContents

cel.Offset(-2, 2) = ""

Range("A1").Select

'MsgBox (t)

```
*****
*****
```

'Boucle pour remplir la matrice DIS (I) de TOUT LES POINTS DE RAMASSAGE

For i = 1 To t - 1

ReDim Preserve Dis(i)

Dis(i - 1) = i

Next i

'Boucle pour remplir la matrice MAT (I,J) de A1 JUSQU'AU P16

For i = 1 To t

For j = 1 To t

ReDim Preserve mat(t, t)

mat(i - 1, j - 1) = cel.Offset(i, j)

Next j

Next i

phase1 : 'sauter les phases de dis(I) et mat(I,J)

'remplir le tableau des voisins par points tab_con

Dim tota As Long

Dim nbre() As Integer

ReDimnbre(t)

Dim tab_con() As Integer

ReDim Preserve tab_con(t, t)

For j = 0 To UBound(mat)

```

M = 0

For i = 1 To UBound(mat)

    If mat(i - 1, j) = 1 Then

        M = M + 1

    End If

    If mat(i - 1, j) = 1 Then

        tab_con(M, j) = i

    End If

    If mat(i - 1, j) = 1 Then

        End If

    Next i

    tota = tota + M

    nbre(j) = M

    Next j

    *****

    *****

    'Trouver les manquants entre les colonnes du même tableau nbs(i,j)

    Dim ktAs Integer

    Dim nbs() As Integer

    ReDimnbs(t, t)

    For k = 1 To (UBound(tab_con) - 1)

        kt = 0

```

```

For i = 0 To UBound(Dis)

    For j = 0 To (UBound(tab_con) - 1)

        If Dis(i) = tab_con(j, k - 1) Then

            GoTo Continue1 'je passe au suivant sur la liste des points disponibles

        Else

            If j = t - 1 Then ' Il faut que le point dis (i) soit comparé avec toute les J possibles

                kt = kt + 1

                nbs(kt - 1, k - 1) = Dis(i)

                GoTo Continue1 'je passe au suivant

            End If

        End If

    Next j

Continue1 :

Next i

Next k

'*****

*****

'Trouver le nombre des manquants par point df (i)

Dim nbres As Integer

Dim df() As Integer

For j = 1 To t - 1

```

```

nbres = 0

For i = 1 To t - 1

    If nbs(i - 1, j - 1) <> 0 Then nbres = nbres + 1

Next i

ReDim Preserve df(j - 1)

df(j - 1) = nbres

Next j

*****

*****

'Trouver le minimum des manquantmin_manq

Dim min_manq As Integer

Dim point As Integer

min_manq = 455 'un chiffre grand pour le démarrage

For j = 1 To t - 1

    If min_manq <= df(j - 1) Then

        GoTo Continue2 'je passe au suivant j

    Else

        min_manq = df(j - 1)

        point = j

    End If

Continue2 :

Next j

```

```

'CEL4.Offset(0, point) = 1

cel.Offset(t, point) = 1

cel.Offset(-2, 3 + iteration) = point

cel4.Offset(iteration - 1, g - 1) = point 'Écrire l'arrêt pris en haut de la page

cel3.Offset(g - 1, 2 + iteration) = point 'Écrire l'arrêt pris en haut de la page

*****

*****

'Création d'un tableau par points par % de connexion

' Dim pourc1() As Single

'ReDim pourc1(t - 1)

'For j = 1 To t - 1

' pourc1(j - 1) = (nbre(j - 1) / tota)

'Sheets("mip").Range("S40").Offset(1, J - 1) = (pourc1(J - 1))

' Next j

*****

*****

'Création de la boucle du métaheuristique

If min_manq = 0 Then

GoTo FIN

End If

'Recréation de la matrice dis(i)

```



```

*****
*****

    For i = 1 To min_manq

ReDim Preserve Dis(i)

Dis(i - 1) = nbs(i - 1, point - 1)

'    cel2.Offset(iteration + 1, i) = nbs(i - 1, point - 1)

    Next i

'Recréation de la matricemat(i,j)

*****
*****

    For i = 1 To t

        For j = 1 To t - 1 'n

            If j = point Then GoTo saut1

            If i = point Then GoTo saut2

ReDim Preserve mat(t, t)

mat(i - 1, j - 1) = cel.Offset(i, j)

saut1 :

        Next j

saut2 :

    Next i

    iteration = iteration + 1

If iteration = t + 1 Then GoTo FIN Else

```

GoTo phase1

FIN :

For i = 1 To t

cel.Offset(-2, 2) = cel.Offset(-2, 2) + cel.Offset(t, i)

Next i

cel3.Offset(g - 1, 0) = 1 * g

cel3.Offset(g - 1, 1) = cel.Offset(-2, 2)

Next g

End Sub

Public Function dist(x, y, z, w)

Dim V1, j, k As Integer

V1 = Sqr((x - z) ^ 2 + (y - w) ^ 2)

dist = V1

End Function

Public Function Angle(A, B, x, y)

Dim V1 As Double

V1 = (WorksheetFunction.Acos((y - B) / dist(A, B, x, y))) * 180 * 7 / 22

If A > x Then

Angle = V1

Else

Angle = 360 - V1

End If

End Function

ANNEXE VI

Les interfaces d'utilisation de ces programmes

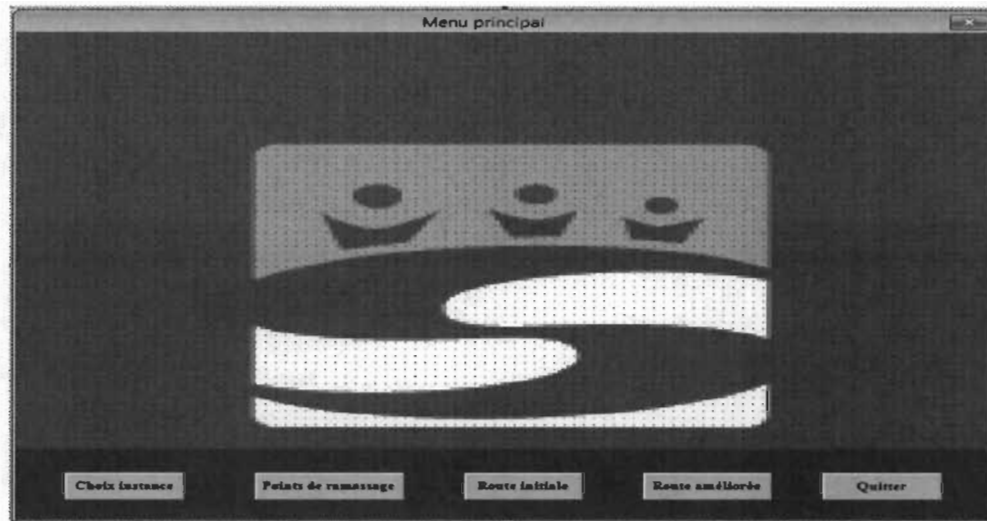


Figure d'annexe 28 : Le menu principal du programme

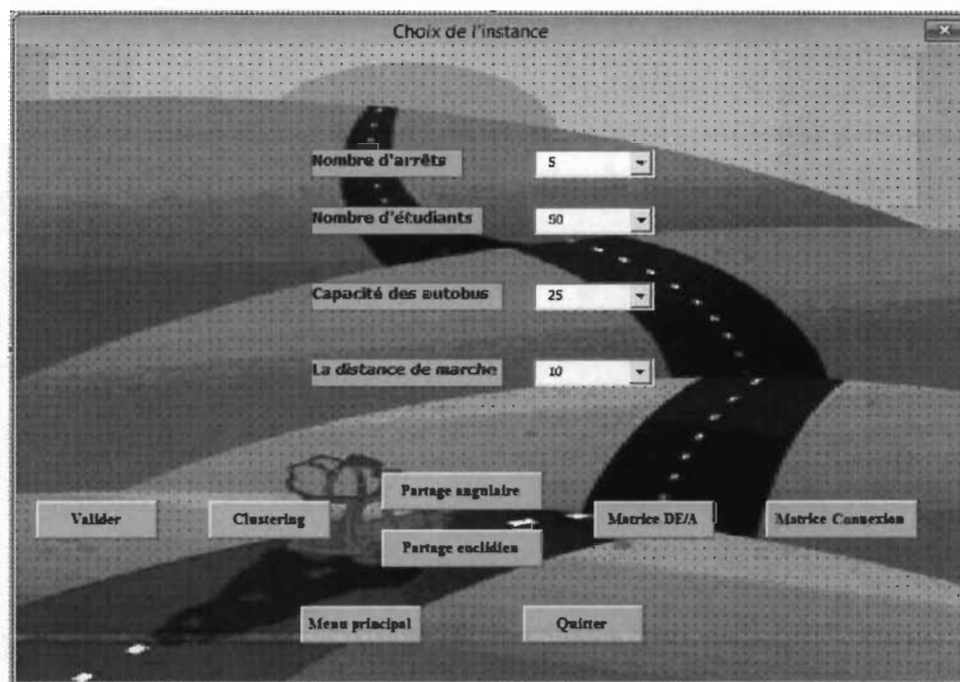


Figure d'annexe 29 : Le menu du choix de l'instance avec la représentation



Figure d'annexe 1 : Le menu de l'algorithme d'optimisation des arrêts



Figure d'annexe 31 : Le menu de routage initial

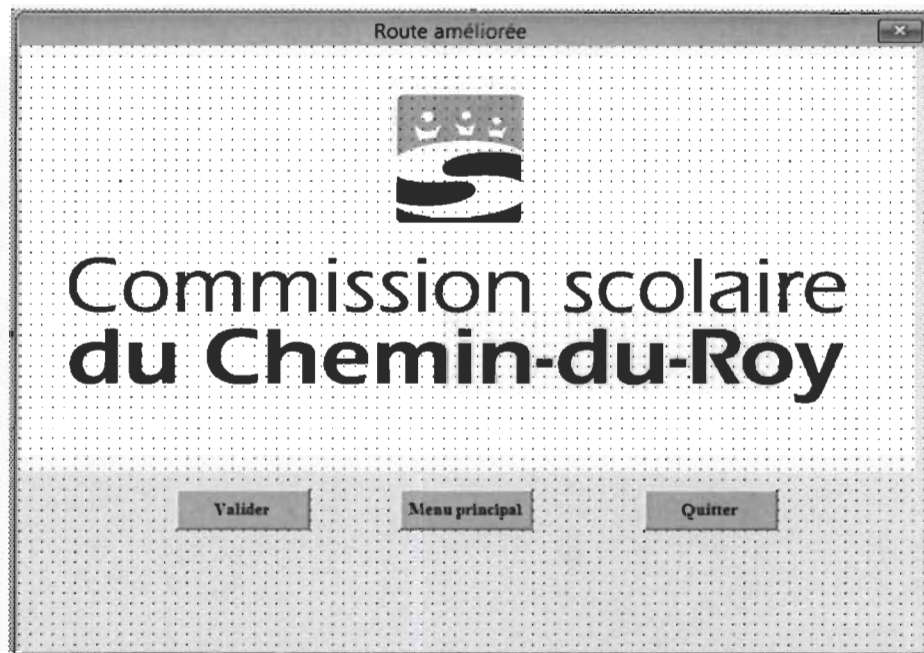
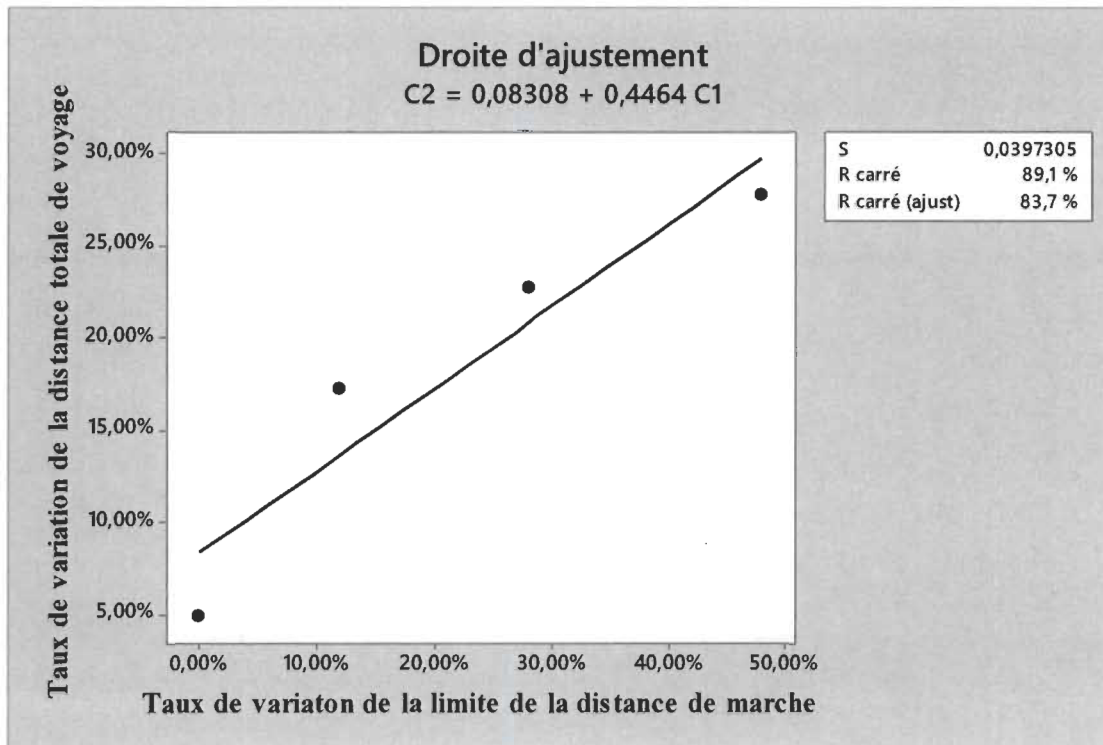


Figure d'annexe 32 : Le menu du routage amélioré

ANNEXE VII

Analyse statistique de la validation des résultats



Analyse de régression : C2 en fonction de C1

L'équation de régression est

$$C2 = 0,08308 + 0,4464 C1$$

$$S = 0,0397305 \quad R \text{ carré} = 89,1 \% \quad R \text{ carré (ajust)} = 83,7 \%$$

Analyse de variance

Somme des

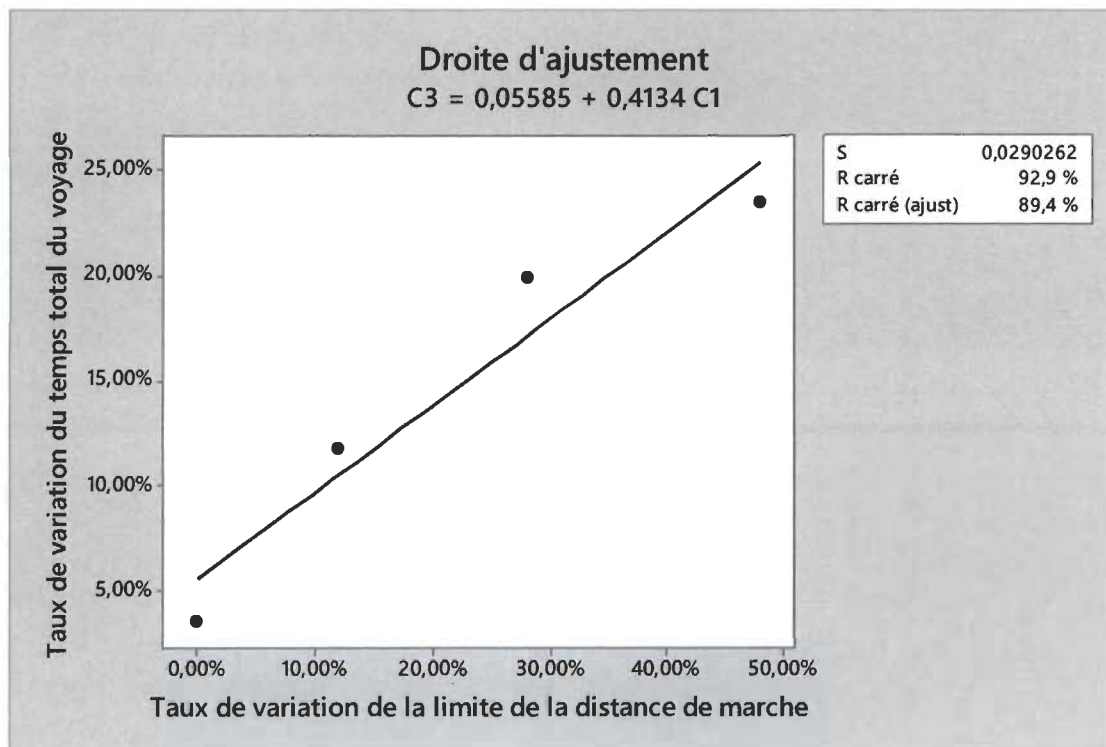
Source DL carrés CM F P

Régression 1 0,0258221 0,0258221 16,36 0,056

Erreur 2 0,0031570 0,0015785

Total 3 0,0289791

Droite d'ajustement : C2 en fonction de C1



Analyse de régression : C3 en fonction de C1

L'équation de régression est

$$C3 = 0,05585 + 0,4134 C1$$

$S = 0,0290262$ $R \text{ carré} = 92,9 \%$ $R \text{ carré (ajust)} = 89,4 \%$

Analyse de variance

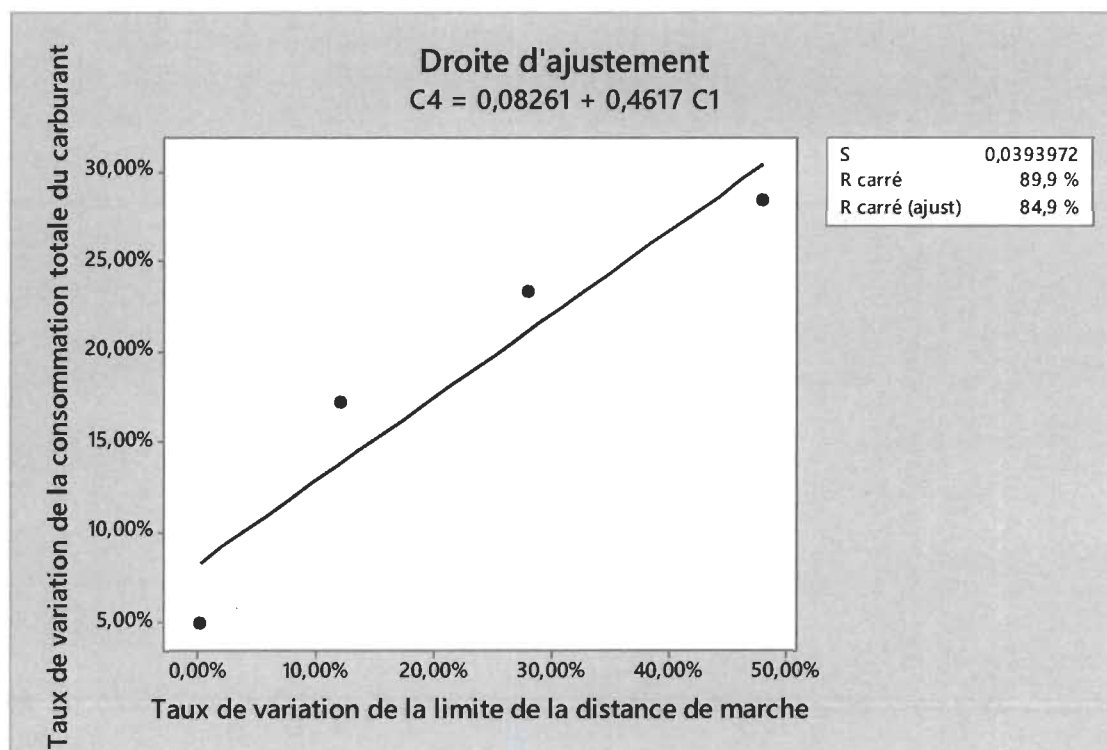
Somme des

Source DL carrés CM F P

Régression 1 0,0221435 0,0221435 26,28 0,036

Erreur 2 0,0016850 0,0008425

Total 3 0,0238286



Analyse de régression : C4 en fonction de C1

L'équation de régression est

$$C4 = 0,08261 + 0,4617 C1$$

$$S = 0,0393972 \quad R \text{ carré} = 89,9 \% \quad R \text{ carré (ajust)} = 84,9 \%$$

Analyse de variance

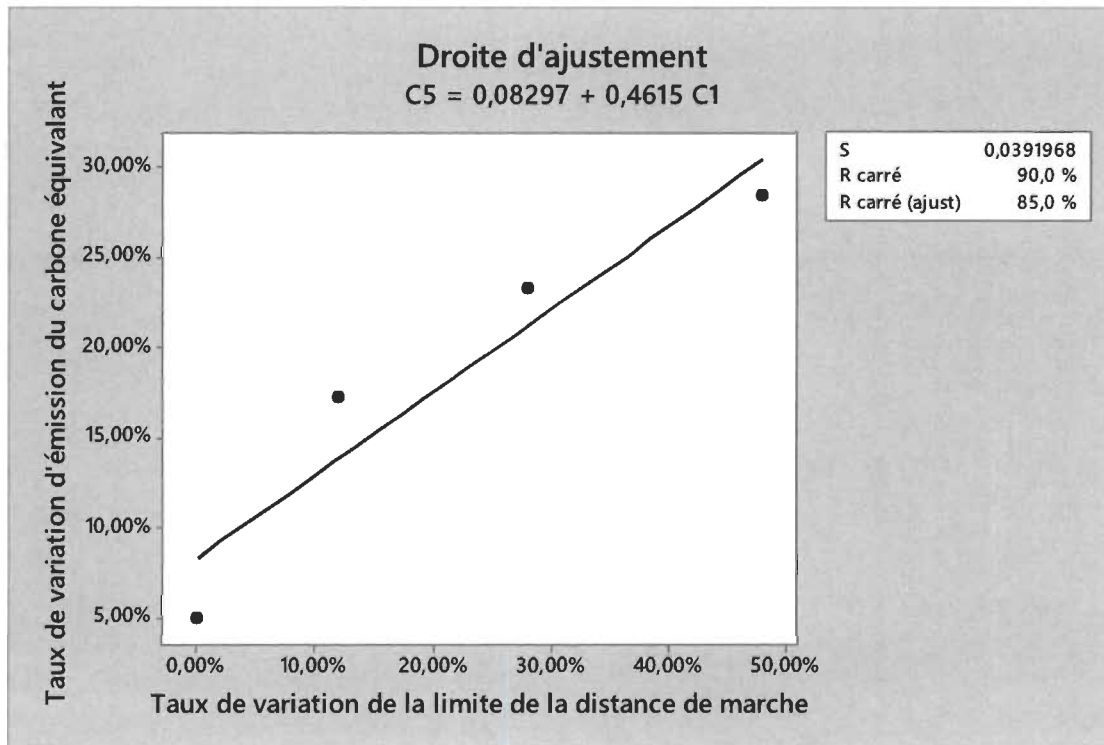
Somme des

Source DL carrés CM F P

Régression 1 0,0276318 0,0276318 17,80 0,052

Erreur 2 0,0031043 0,0015521

Total 3 0,0307361



Analyse de régression : C5 en fonction de C1

L'équation de régression est

$$C5 = 0,08297 + 0,4615 C1$$

$$S = 0,0391968 \quad R \text{ carré} = 90,0 \% \quad R \text{ carré (ajust)} = 85,0 \%$$

Analyse de variance

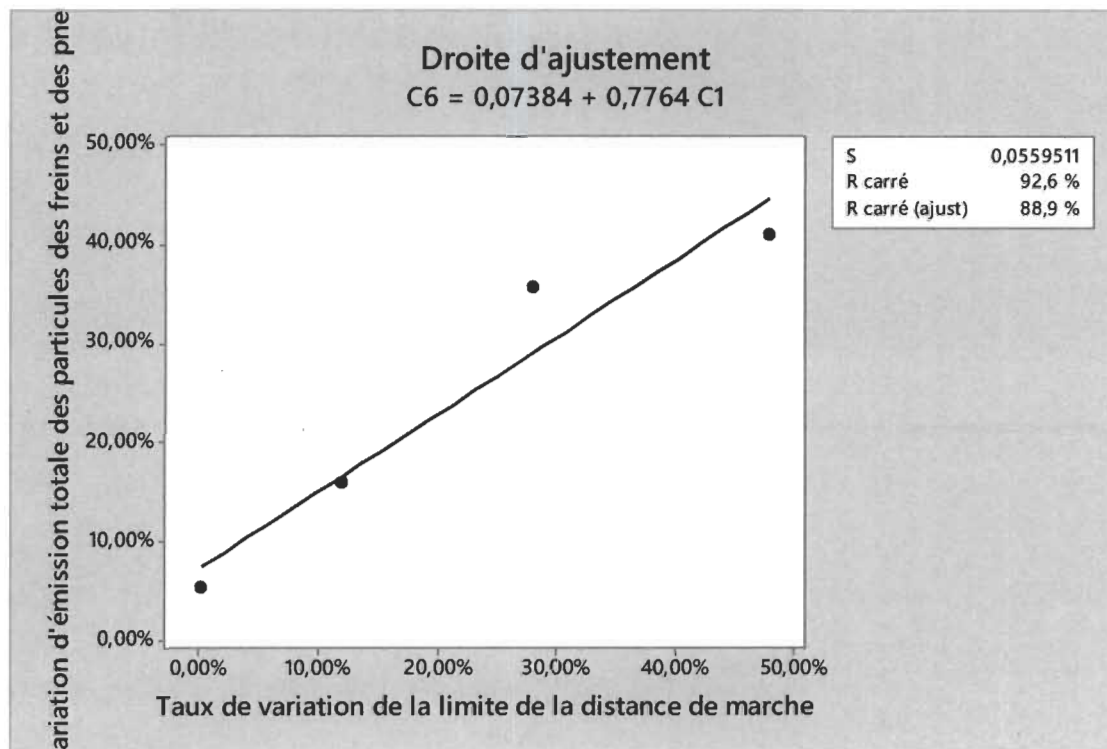
Somme des

Source DL carrés CM F P

Régression 1 0,0275975 0,0275975 17,96 0,051

Erreur 2 0,0030728 0,0015364

Total 3 0,0306702



Analyse de régression : C6 en fonction de C1

L'équation de régression est

$$C6 = 0,07384 + 0,7764 C1$$

$S = 0,0559511$ $R \text{ carré} = 92,6 \%$ $R \text{ carré (ajust)} = 88,9 \%$

Analyse de variance

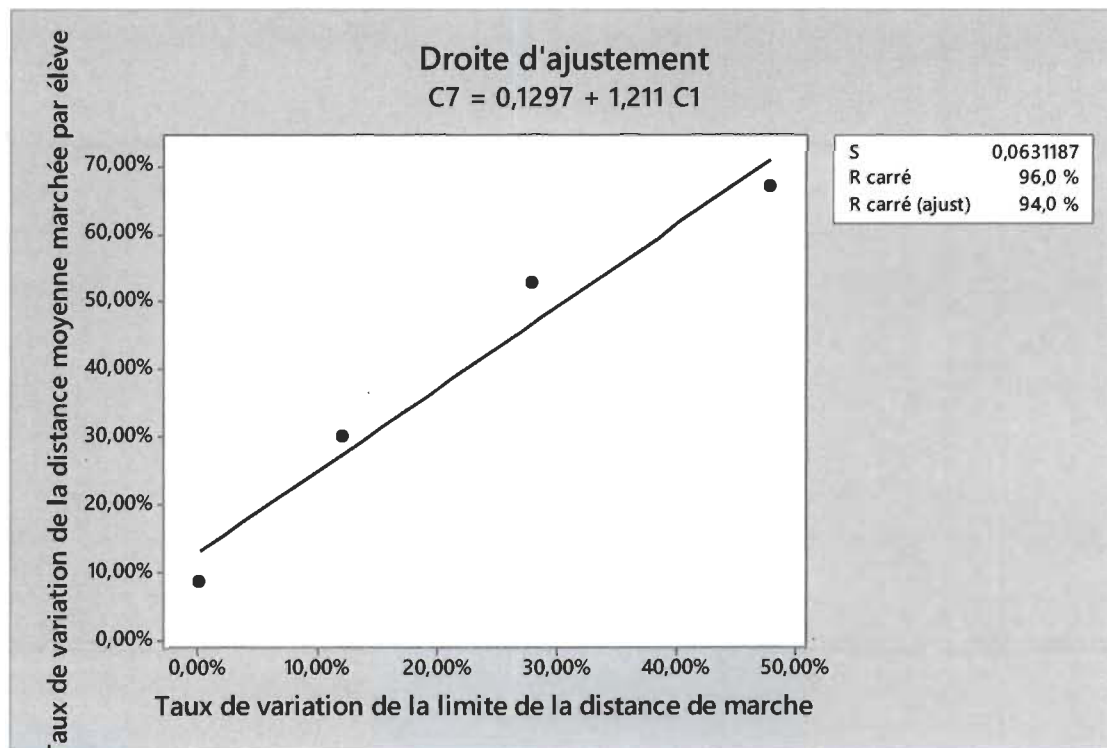
Somme des

Source DL carrés CM F P

Régression 1 0,0781278 0,0781278 24,96 0,038

Erreur 2 0,0062611 0,0031305

Total 3 0,0843889



Analyse de régression : C7 en fonction de C1

L'équation de régression est :

$$C7 = 0,1297 + 1,211 C1$$

$$S = 0,0631187 \quad R \text{ carré} = 96,0 \% \quad R \text{ carré (ajust)} = 94,0 \%$$

Analyse de variance

Somme des				
Source	DL	carrés	CM	F P
Régression	1	0,190140	0,190140	47,73 0,020
Erreur	2	0,007968	0,003984	
Total	3	0,198108		